

基于 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式的作物系数差异分析

宋妮^{1,2}, 孙景生^{1,2}, 王景雷^{1,2*}, 陈智芳^{1,2}, 强小嫚^{1,2}, 刘祖贵^{1,2}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002; 2. 农业部作物需水与调控重点开放实验室, 新乡 453002)

摘要: 该文针对直接采用 20 世纪 90 年代初确定的中国主要作物的作物系数估算作物需水量存在的主要问题, 分析了作物系数需要校正的原因: Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式在计算 ET_0 时差异较大, 且对生育期较长的越冬作物的影响要高于生育期较短的夏季作物。同时利用河南省 18 站多年气象资料, 分析了引起两公式差异的因素: 辐射项处理的不同是引起两公式差异的主要原因。秋冬季, 采用两公式计算的月 ET_0 、 ET_{rad} 值差异均高于春夏季, 空气动力学项对 ET_0 值的影响与风速有关, 较高的风速可能导致空气动力学项的影响高于辐射项; 采用 Penman-Monteith 公式计算 ET_{rad} 值时, 受季节、站点情况影响小, 稳定性高, 18 站均表现为: 平均气温对 ET_{rad} 的影响最小, 1、11、12 月相对湿度对 ET_{rad} 的影响较大, 2-10 月日照时数对 ET_{rad} 的影响较大。并根据 2 种不同的 ET_0 估算方法的关系, 提出了基于 Penman-Monteith 公式的作物系数校正方法, 对于提高作物需水量的估算精度有重要意义。

关键词: 腾发量, 作物, 气象, Penman 修正式, Penman-Monteith 公式, 作物系数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.011

中图分类号: S161

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0088-10

宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 基于 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式的作物系数差异分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 88-97.

Song Ni, Sun Jingsheng, Wang Jinglei, et al. Analysis of difference in crop coefficients based on modified Penman and Penman-Monteith equations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 88-97. (in Chinese with English abstract)

0 引言

作物系数是估算作物需水量的一个重要参数, 中国 20 世纪 90 年代曾根据建国以来长达 30 多年资料确定了中国 300 多个站点主要作物的作物系数, 但当时参考作物蒸发蒸腾量是采用 FAO 在 1979 年提出的 Penman 修正式^[1]计算, 近年来国内外许多学者多年的试验应用表明, FAO 在 1998 年推荐的 Penman-Monteith 公式是目前计算参考作物蒸发蒸腾量的最好方法, 若仍采用 20 世纪 90 年代确定的作物系数进行作物需水量的估算, 势必造成较大误差^[2]。刘钰等(1997 年)也曾建议在国内推广应用标准化的 Penman-Monteith 方程来计算参照作物蒸发蒸腾量, 并以此为标准校正其他经验方

法和确定新的作物系数^[3]。鉴于此, 本文试图通过比较 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式在计算参考作物蒸发蒸腾量的差异, 分析引起差异的主要因素, 探寻中国 20 世纪 90 年代确定的作物系数需要校正的原因, 以便提出基于 Penman-Monteith 公式的作物系数校正方法, 提高作物需水量的估算精度。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

数据来源于国家气象局, 选用河南省 18 个气象站点近年逐旬地面气象观测资料, 要素包括平均最高气温、平均最低气温、平均气温、平均相对湿度、平均风速、平均日照时数。

基于 Penman 修正的作物系数来源于陈玉民、郭国双等主编的《中国主要作物需水量与灌溉》一书^[11]。

1.2 参考作物蒸发蒸腾量的计算方法

采用联合国粮农组织 (FAO) 先后推荐的 Penman 修正式^[4]和 Penman-Monteith 公式^[5]计算参考作物蒸发蒸腾量, 具体计算公式如下:

收稿日期: 2013-03-21 修订日期: 2013-08-23

基金项目: “863”计划 (2011AA100502); 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201203077); 科技基础性工作专项 (2007FY120100)

作者简介: 宋妮 (1979-), 女, 陕西西安人, 中国农业工程学会会员 (E041600015M), 主要从事作物生理节水基础理论研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453002。Email: xnsongni@yahoo.com.cn
*通信作者: 王景雷 (1972-), 男, 河南开封人, 研究员, 主要从事农业节水和水资源高效利用研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453002。Email: firijl@126.com

Penman 修正:

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{aero}$$

$$= \frac{\frac{P_0 \Delta}{p\gamma} R_n}{\frac{P_0 \Delta}{p\gamma} + 1.0} + \frac{0.26(e_s - e_a)(1 + Cu_2)}{\frac{P_0 \Delta}{p\gamma} + 1.0} \quad (1)$$

$$R_n = Q_s - F$$

$$= 0.75R_A \left(a + b \frac{n}{N} \right) - \sigma T_k^4 \left(0.56 - 0.079\sqrt{e_a} \right) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

式中: ET_0 、 ET_{rad} 、 ET_{aero} 分别为参考作物蒸发蒸腾量、辐射项部分、空气动力学项部分, mm/d; R_n 为净辐射, mm/d; Q_s 为扣除反射之后到达地面的太阳辐射, mm/d; F 为以蒸发水层深表示的地面有效辐射, 亦称长波辐射项, mm/d; P_0 为海平面平均气压, hPa; P 为测站平均气压, hPa; Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线在气温处的斜率, hPa/°C; γ 为干湿表常数为 0.66, mb/°C; e_s 为饱和水汽压, hPa; e_a 为实际水汽压, hPa; u_2 为距地面 2 m 高处风速, m/s; C 为风速改正系数; R_A 为以蒸发水层深表示的大气顶理论太阳辐射, mm/d; n 为月实际平均日照时数, h; N 为不同纬度各月可能的理论日照时数, hr/d; σT_k^4 为绝对黑体辐射, mm; $\sigma = 2.01 \times 10^{-9}$, mm/d·K⁴; a 、 b 系数为根据日照时数估算太阳总辐射的系数, 根据地点、季节取值不同, 本文参考文献[6]的结果, 取值如下: a , 0.152(春)、0.115(夏)、0.301(秋)、0.172(冬); b , 0.556(春)、0.588(夏)、0.311(秋)、0.536(冬), 相应四季的划分为阳历 3 月—5 月为春季, 6 月—8 月为夏季, 9 月到 11 月为秋季, 12 月到第 2 年的 2 月为冬季。

其中部分参数的计算公式为

$$\frac{P_0}{P} = 10 \frac{H}{18400(1 + T/273)}$$

$$e_s = 6.11 \times 10^{\frac{7.63T}{241.9+T}} \quad (T > 0^\circ\text{C})$$

$$e_s = 6.11 \times 10^{\frac{9.5T}{265.5+T}} \quad (T \leq 0^\circ\text{C})$$

$$\Delta = e_s \times \frac{4249.9}{(241.9 + T)^2} \quad (T > 0^\circ\text{C})$$

$$\Delta = e_s \times \frac{5807.7}{(265.5 + T)^2} \quad (T \leq 0^\circ\text{C})$$

$$C = 0.54(T_{\min} \leq 5^\circ\text{C})$$

$$C = 0.07 \times (T_{\max} - T_{\min}) - 0.265 \quad (T_{\min} > 5^\circ\text{C})$$

$$e_a = e_s \times RH/100 \quad (e_a \geq e_s)$$

$$e_a = RH(e_a < e_s)$$

$$N = \frac{4}{15} \times \arcsin \sqrt{\frac{\sin\left(\frac{90.57 + \varphi - \delta}{2}\right) \times \sin\left(\frac{90.57 - \varphi + \delta}{2}\right)}{\cos(\varphi) \cos(\delta)}}$$

$$\delta = 23.5 \times \sin(0.986 \times (30.4 \times J - 15.2) - 78.9)$$

$$R_A = \frac{15.5457(0.1309N \sin(\delta) \sin(\varphi) + \sin(7.5N) \cos(\varphi) \cos(\delta))}{PR(J)^2}$$

$$u_2 = 0.75 \times u_{10}$$

式中, H 为计算站点海拔高程, m; T_{\max} 、 T_{\min} 、 T 分别为月平均最高、最低气温、月平均气温, °C; RH 为相对湿度, %; φ 为计算站点地理纬度, 度; δ 为赤纬, 度; J 为月序, 月; PR 为日地平均距离, 相对值, 12 月依次为 0.984、0.988、0.995、1.003、1.01、1.016、1.016、1.013、1.005、0.997、0.989、0.984; u_{10} 为距地面 10 米高处风速, m/s; T_K 为绝对温度 ($K = ^\circ\text{C} + 273$)。

Penman-Monteith

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{aero}$$

$$= \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} + \frac{\gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$= 0.77R_A \left(a + b \frac{n}{N} \right) - \sigma \left(\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right) \left(0.34 - 0.14\sqrt{e_a} \right) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (4)$$

式中, R_n 、 R_{ns} 、 R_{nl} 、 R_A 、 R_s 、 R_{so} 分别为净辐射、净短波辐射、净长波辐射、晴空太阳总辐射、短波辐射、晴空太阳辐射, MJ/m²·d; Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率, kPa/°C; G 为土壤热通量, MJ/m²·d, 当计算时段为 1 和 10 d 时, 土壤热通量相对较小, 勿略不计; γ 为干湿表常数, KPa/°C; T 为旬平均温度 ($T = (T_{\max} + T_{\min})/2$), °C; e_s 、 e_a 分别为饱和、实际水汽压, kPa; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 为 4.903×10^{-9} MJ/K⁴·m²·d; $T_{\max,K}$ 、 $T_{\min,K}$ 分别为最大、最小绝对温度 ($K = ^\circ\text{C} + 273.16$); 其余参数同上。

其中部分参数的计算公式为

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \right]}{(T + 237.3)^2}$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} \times 101.3 \times \left(\frac{293 - 0.0065H}{293} \right)^{5.26}$$

$$u_2 = u_{10} \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)}$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2}$$

$$e_a = \frac{RH}{100} \times \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2}$$

$$e^0(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right]$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

$$R_A = \frac{118.08}{\pi} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right)$$

$$\omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

式中, d_r 为日-地相对距离的倒数; ω_s 为太阳时角, rad; φ 为地理纬度, rad; δ 为太阳的磁偏角, rad; $e^0(T_{\max})$ 、 $e^0(T_{\min})$ 分别表示空气温度为 T_{\max} 、 T_{\min} 时的饱和水汽压, kPa; J 为年内天数。

1.3 两公式的比较方法

为了比较采用 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量的不同, 本文采用以下符号区分两种方法的计算结果。

$ET_0(P)$ 、 $ET_{rad}(P)$ 、 $ET_{aero}(P)$ 分别表示采用 Penman 修正式计算的参考作物蒸发蒸腾量、辐射项部分、空气动力学项部分。

$ET_0(PM)$ 、 $ET_{rad}(PM)$ 、 $ET_{aero}(PM)$ 分别表示采用 Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量、辐射项部分、空气动力学项部分。

ΔET_0 、 ΔET_{rad} 、 ΔET_{aero} 分别表示两公式参考作物蒸发蒸腾量的总偏差、由辐射项处理不同造成的参考作物蒸发蒸腾量的偏差、由空气动力学项处理不同造成的处理不同造成的参考作物蒸发蒸腾量的偏差。

$$\Delta ET_0 = ET_0(PM) - ET_0(P) \quad (5)$$

$$\Delta ET_{rad} = ET_{rad}(PM) - ET_{rad}(P) \quad (6)$$

$$\Delta ET_{aero} = ET_{aero}(PM) - ET_{aero}(P) \quad (7)$$

R_{rad} 、 R_{aero} 表示由辐射项、空气动力学项处理

不同造成的偏差占总偏差的百分数。

$$R_{rad} = \frac{\Delta ET_{rad}}{\Delta ET_0}; \quad R_{aero} = \frac{\Delta ET_{aero}}{\Delta ET_0} \quad (8)$$

$$R_{rad} + R_{aero} = 1 \quad (9)$$

RD 为相对偏差, 表示采用 Penman-Monteith 公式计算的 ET_0 相对于 Penman 修正式计算的 ET_0 的变化率。

$$RD = \frac{\Delta ET_0}{ET_0(P)} = \frac{\Delta ET_{rad}}{ET_0(P)} + \frac{\Delta ET_{aero}}{ET_0(P)} \quad (10)$$

$$= R_{0rad} + R_{0aero}$$

1.4 敏感性分析

一般通过敏感性分析方法分析影响参考作物蒸发蒸腾量变化的主导因子并进行定量化评估。本文采用此方法评价气象因子对参考作物蒸发蒸腾量辐射项的影响。在假定其他变量保持不变的前提下, 使 3 个影响参考作物蒸发蒸腾量辐射项的气象因子 (平均气温、相对湿度、日照时数) 分别增加 10%, 重新计算 ET_{rad} , 并根据公式 (11) 计算敏感系数^[7-8]。

$$S = \frac{\Delta ET_{rad}}{ET_{rad}} \frac{|X|}{\Delta X} \quad (11)$$

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸发蒸腾量逐月变化比较

根据河南省 18 个气象站点气象数据分别计算 $ET_0(P)$ 、 $ET_0(PM)$ 见表 1, 计算绝对偏差 ΔET_0 、相对偏差 RD 并绘制如图 1 所示。

从图 1 可见, 所有站点所有月份 ΔET_0 均为正值, 逐月比较后发现, 多数站点 11 月份 ΔET_0 最大, 平均 13.1 mm, 5 月份 ΔET_0 最小, 平均 6.22 mm。相对偏差的分析表明, 所有站点的 RD 在年内均呈先下降后上升的趋势, 10 月一翌年 3 月变化率明显高于 4—9 月份, 所有站点 12 月份 RD 最高, 平均 60.6%, 卢氏站点相对偏差高达 101.34%, 多数站点 5 月份 RD 最低, 范围从 1.84%~8.73%, 平均 5.57%。以上分析表明秋冬季, 两公式计算的逐月 ET_0 差异较大, 春夏季差异较小。

2.2 基于 Penman 修正式、Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量差异的成因分析

无论是 Penman 修正式还是 Penman-Monteith 公式, 均可分成能量平衡和质量输送两个部分, 前者称为辐射项 (ET_{rad}), 后者称为空气动力学项 (ET_{aero}), 分别逐月计算两公式的辐射项和空气动力学项, 结果如表 2 所示。

表 1 基于 Penman 修正式、Penman-Monteith 公式计算的月 ET_0
Table 1 Monthly ET_0 based on modified Penman and Penman-Monteith equations

mm

月份	ET_0	安阳	新乡	三门峡	卢氏	孟津	郑州	信阳	固始	栾川	开封	商丘	洛阳	平均
1 月	$ET_0(P)$	17.83	20.08	22.91	14.11	27.75	24.56	22.79	21.83	18.11	24.06	18.86	20.55	21.66
	$ET_0(PM)$	27.75	30.82	33.87	25.16	40.71	35.39	31.32	30.44	30.74	34.13	28.18	31.76	31.88
2 月	$ET_0(P)$	30.89	31.93	36.41	25.43	36.94	34.13	31.61	31.21	27.53	35.33	29.77	28.00	31.68
	$ET_0(PM)$	39.18	40.43	45.12	34.17	46.56	42.55	38.22	37.42	36.91	43.27	37.46	35.33	39.59
5 月	$ET_0(P)$	128.15	120.71	121.40	96.86	128.47	126.99	102.41	104.05	99.28	121.85	110.32	110.90	112.75
	$ET_0(PM)$	133.59	126.67	131.14	102.59	136.50	131.94	111.35	112.88	106.65	129.34	115.60	116.38	118.97
6 月	$ET_0(P)$	133.42	125.79	125.79	99.99	131.61	131.47	102.43	104.00	99.62	124.72	112.76	116.83	117.01
	$ET_0(PM)$	140.56	132.71	136.68	107.26	142.94	139.51	111.98	114.39	108.63	134.70	120.26	123.71	125.46
7 月	$ET_0(P)$	103.69	104.64	117.22	99.26	105.45	104.98	107.25	108.45	94.88	103.97	96.19	101.74	102.97
	$ET_0(PM)$	110.82	111.43	129.19	107.34	115.55	113.00	116.72	115.81	104.41	113.02	103.31	108.78	111.13
8 月	$ET_0(P)$	92.37	95.68	101.64	84.66	90.47	92.12	93.94	99.15	81.90	92.25	83.62	86.45	90.52
	$ET_0(PM)$	100.78	104.42	115.95	94.87	101.92	101.39	103.31	107.74	93.64	102.34	91.20	94.41	99.90
11 月	$ET_0(P)$	25.36	25.23	28.98	20.09	34.92	32.10	31.47	31.59	23.86	31.30	26.31	27.56	29.27
	$ET_0(PM)$	37.27	38.36	41.67	32.11	51.97	46.30	44.24	46.30	38.81	45.29	38.58	40.53	42.37
12 月	$ET_0(P)$	15.93	18.22	20.82	11.95	26.93	25.09	22.62	22.66	16.65	22.78	17.74	19.88	20.83
	$ET_0(PM)$	26.97	29.95	33.12	24.06	42.52	38.04	34.08	34.41	31.16	34.37	28.68	33.43	33.04
全年	$ET_0(P)$	837.4	820.75	858.79	688.2	877.08	864.56	783.55	792.44	702.27	851.23	763.7	774.47	799.37
	$ET_0(PM)$	944.08	931.21	996.97	798.02	1021.35	977.35	897.46	907.81	821.63	971.82	863.40	876.96	911.90

注：1、表中 $ET_0(P)$ 采用月气象数据计算， $ET_0(PM)$ 采用旬气象数据计算并按月逐旬累加。2、表中安阳-固始站 ET_0 为 1971—2010 年平均值，栾川-商丘为 1981—2010 年平均值，洛阳站为 1981—1990 年平均值，由于版面所限，表中仅取代表性站点，下同。

Note: 1、 $ET_0(P)$ in the table is calculated based on monthly meteorological date, and $ET_0(PM)$ is accumulated by the month based on the meteorological date in ten days. 2、 ET_0 in the former eight stations is the averaged value from 1971 to 2010, ET_0 in Luanchuan, Kaifeng and Shangqiu is the averaged value from 1981 to 2010, and it in the last station is from 1981 to 1990. It in the representative stations is listed in the table because of the limitation of layout, the same below.

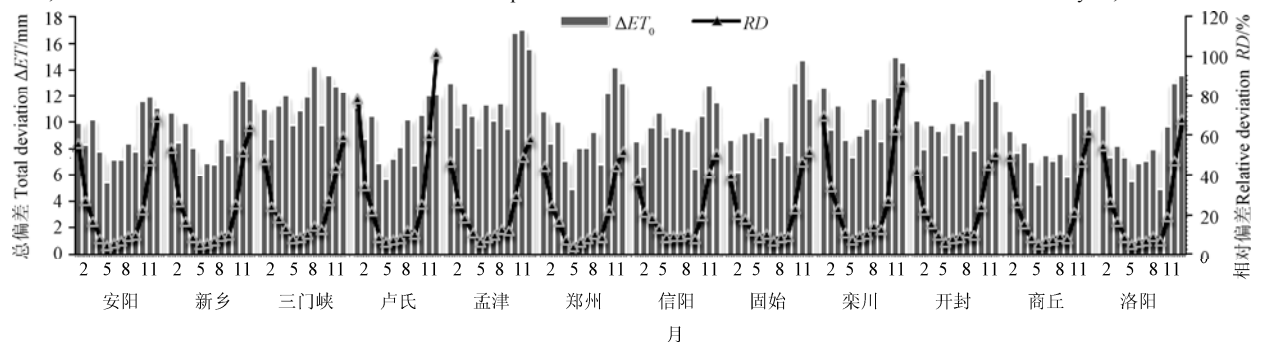


图 1 基于 Penman 修正式、Penman-Monteith 公式计算的月 ET_0 绝对偏差、相对偏差趋势图

Fig.1 Trend map of absolute and relative deviations for monthly ET_0 based on modified Penman and Penman-Monteith equations

表 2 基于 Penman 修正式、Penman-Monteith 公式计算的月 ET_{rad} 和 ET_{aero}

Table 2 Monthly ET_{rad} and ET_{aero} based on modified Penman and Penman-Monteith equations

mm

月份	项目	安阳	新乡	三门峡	卢氏	孟津	郑州	信阳	固始	栾川	开封	商丘	洛阳	平均
1 月	$ET_{rad}(P)$	-0.56	-0.26	-0.51	0.78	-1.28	0.43	5.04	5.23	0.42	0.85	1.93	0.17	1.65
	$ET_{aero}(P)$	18.39	20.34	23.42	13.33	29.03	24.12	17.75	16.60	17.69	23.21	16.93	20.37	20.01
	$ET_{rad}(PM)$	11.12	11.95	12.48	15.72	11.55	12.00	15.39	14.78	15.84	11.65	12.74	13.36	13.43
	$ET_{aero}(PM)$	16.63	18.87	21.40	9.43	29.16	23.39	15.93	15.67	14.90	22.48	15.44	18.40	18.46
4 月	$ET_{rad}(P)$	48.81	50.36	47.28	46.76	48.24	48.98	50.57	51.88	48.15	50.31	49.69	50.09	49.50
	$ET_{aero}(P)$	49.06	41.69	44.98	32.08	47.42	47.24	30.15	27.01	31.27	44.96	35.25	36.68	36.82
	$ET_{rad}(PM)$	56.76	59.26	59.16	60.95	56.61	56.77	56.59	56.41	64.01	56.69	56.60	63.17	58.28
	$ET_{aero}(PM)$	48.90	40.79	45.07	24.79	49.50	46.49	34.87	31.72	24.05	47.93	35.32	30.97	36.12
7 月	$ET_{rad}(P)$	79.76	83.21	85.36	79.77	79.34	80.66	86.60	90.96	76.41	80.41	76.91	78.83	81.07
	$ET_{aero}(P)$	23.93	21.43	31.86	19.48	26.12	24.31	20.65	17.49	18.48	23.56	19.27	22.90	21.90
	$ET_{rad}(PM)$	85.77	89.44	92.89	93.81	84.36	86.00	89.03	92.04	91.09	84.25	81.74	87.98	87.23
	$ET_{aero}(PM)$	25.05	21.98	36.31	13.52	31.19	27.00	27.69	23.78	13.32	28.78	21.57	20.80	23.91
10 月	$ET_{rad}(P)$	23.57	25.19	25.38	27.86	24.12	25.87	34.08	34.10	26.54	26.25	28.03	28.31	28.41
	$ET_{aero}(P)$	28.04	24.47	25.34	13.79	33.09	29.57	20.36	22.71	17.87	29.60	22.93	22.67	24.57
	$ET_{rad}(PM)$	38.91	41.34	40.16	44.88	38.49	40.54	44.76	44.10	43.86	39.82	42.13	42.30	41.98
	$ET_{aero}(PM)$	24.32	20.75	24.10	7.34	35.50	27.12	20.11	25.71	12.41	29.39	19.54	18.32	22.41
12 月	$ET_{rad}(P)$	-3.11	-3.07	-3.68	-1.96	-5.25	-2.71	1.89	2.03	-3.09	-1.81	-0.47	-3.67	-1.39
	$ET_{aero}(P)$	19.05	21.29	24.49	13.90	32.18	27.80	20.73	20.63	19.74	24.58	18.21	23.55	22.22
	$ET_{rad}(PM)$	10.22	11.06	11.47	14.62	10.51	10.97	15.31	14.60	14.70	10.86	11.89	12.21	12.63
	$ET_{aero}(PM)$	16.75	18.89	21.65	9.44	32.01	27.07	18.76	19.81	16.46	23.50	16.79	21.22	20.40
全年	$ET_{rad}(P)$	465.01	484.44	465.79	456.00	454.28	472.57	517.40	537.61	449.48	476.84	472.33	470.08	480.11
	$ET_{aero}(P)$	372.40	336.31	393.02	232.18	442.80	391.98	266.14	254.84	252.78	374.39	291.38	304.38	319.26
	$ET_{rad}(PM)$	589.78	616.51	610.26	635.98	578.74	593.13	610.60	615.10	636.83	580.60	582.21	617.90	602.63
	$ET_{aero}(PM)$	354.29	314.69	386.71	162.04	442.63	384.21	286.85	292.71	194.79	391.23	281.20	259.07	308.27

从表 2 可见,部分站点 1 月和 12 月采用 Penman 修正式计算的 ET_{rad} 出现了负值,这是由于 Penman 修正式中 $R_n=Q_s-F<0$ 引起,分析现有站点中 1 月 ET_{rad} 为正值而 12 月为负值的情况发现,主要有两类情况,一是由于 12 月份 F 值明显大于 1 月份所致, F 值主要与平均气温、日照时数、相对湿度有关,当 12 月份平均气温、日照时数高于 1 月份,相对湿度低于 1 月份时,12 月份 F 值明显增大, $R_n<0$,且数值较大,三因子共同影响 F 值的大小;二是当 12 月和 1 月 F 值差异较小或 12 月 F 值<1 月时, Q_s 主要受 R_A 、 n 、 N 的影响, R_A 和 n 与之正

相关, N 与之负相关,相同站点 12 月份 R_A 均小于 1 月份, N 大于 1 月份,多数站点两月份间 n 差异较小,因子 12 月份 Q_s 小于 1 月份, $R_n<0$ 。相反采用 Penman-Monteith 公式计算的 ET_{rad} 均为正值,这是由于 Penman-Monteith 公式对 R_n 的计算进行了修正,将冠层反射系数从 0.25 降到 0.23,采用最高、最低平均温度代替气象平均温度,调整了 R_{nl} 计算公式中的系数,避免了 ET_{rad} 计算结果负值的产生^[9]。

根据表 2 所示数据计算各站点 ΔET_{rad} 、 ΔET_{aero} 、 R_{rad} 、 R_{aero} 与总偏差 ΔET_0 一起绘制各站点逐月趋势图,如图 2、3 所示。

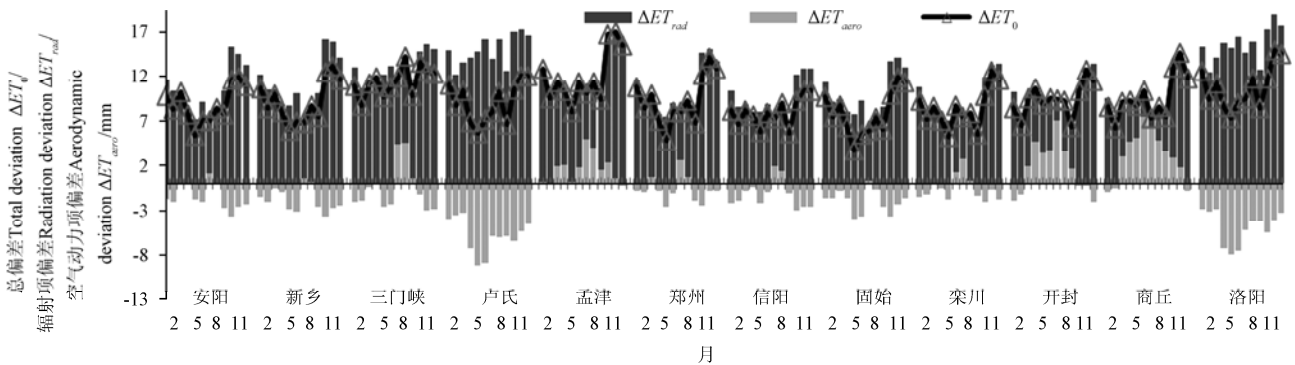


图 2 基于 Penman 修正式、Penman-Monteith 公式计算的月 ΔET_{rad} 、 ΔET_{aero} 趋势图

Fig.2 Trend map of monthly ΔET_{rad} and monthly ΔET_{aero} based on modified Penman and Penman-Monteith equations

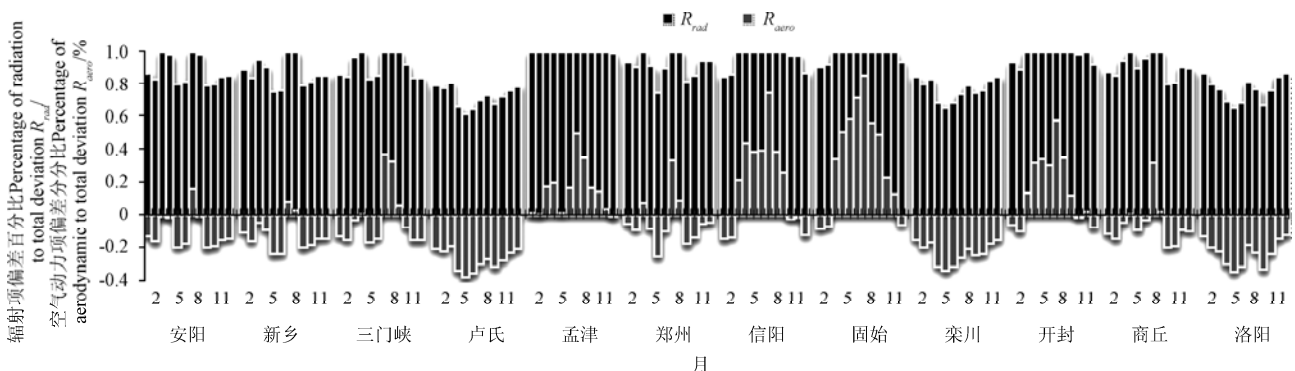


图 3 基于 Penman 修正式、Penman-Monteith 公式计算的月 R_{rad} 、 R_{aero} 趋势图

Fig.3 Trend map of monthly R_{rad} and monthly R_{aero} based on modified Penman and Penman-Monteith equations

从图 2 可见,所有站点所有月份 ΔET_{rad} 均大于 0,卢氏、栾川、洛阳站点所有月份 ΔET_{aero} 均小于 0,其他站点 ΔET_{aero} 有正有负,其中 7 月份 ΔET_{aero} 均大于 0, ΔET_{aero} 小于 0 的情况较多出现在冬季, ΔET_{rad} 全年累计平均为 122.5 mm, ΔET_{aero} 为 -10.99 mm,表明 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式计算的 ET_0 值不同主要是由于辐射项结果不同引起。所有站点 10 月-翌年 1 月 ΔET_{rad} 较高,11 月份站点平均 14.6 mm,7 月份 ΔET_{rad} 最低,平均为 6.15 mm,表明 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式计算的 ET_0 值在冬季差异较大,夏季差异较小。

从图 3 可见,9 月-翌年 3 月,所有站点的 R_{rad} 均大于 R_{aero} ,表明秋冬季辐射项对 ET_0 的影响占主要原因;4-8 月,多数站点的 R_{rad} 仍大于 R_{aero} ,固始站 R_{rad} 小于 R_{aero} ,孟津、信阳、开封站 7 月份 R_{rad} 也小于 R_{aero} ,这主要由于这些站点风速较大有关,这些站点 4-8 月 10 m 高处平均风速基本在 3.1、2.8、2.7、2.5、2.3 m/s 左右,空气动力学项对 ET_0 的影响高于辐射项的影响,表明春夏季,除辐射外,风速是影响辐射项与空气动力学项比例分配的一个重要因素。

此外,图 2 中,卢氏、栾川站 ΔET_{rad} 季节间差

异表现与其他站点不同，其他站点冬季和夏季间差异较大，而这两站冬季和夏季间差异较小，且各月 ΔET_{rad} 均高于其他站点，年累计分别为 180.0 和 187.4 mm。对两公式计算的逐月 ET_{rad} 分析发现，采用 Penman 修正式计算的两站逐月 ET_{rad} 相比其他站点较低，采用 Penman-Monteith 公式计算的两站逐月 ET_{rad} 高于其他站点。这主要是由于该两站高程较高（568.8、742.4 m），高程越高，采用 Penman-Monteith 公式计算的 P 越小， γ 越小， ET_{rad} 越大，且夏季增加幅度高于冬季；当采用 Penman 修正式计算 ET_{rad} 时，高程增加， $\frac{P_0}{P}$ 增加，分子分母同时增加， ET_{rad} 的变化趋势同原始 ET_{rad} 的正负有关，冬季， $ET_{rad} < 0$ ，高程增加， ET_{rad} 不变或减小；夏季， $ET_{rad} > 0$ ，高程增加， ET_{rad} 不变或增大，且 $\frac{\frac{P_0}{P} \Delta}{\frac{P \gamma}{P_0 \Delta} + 1} < 1$ ，高程对其影响较 Penman-Monteith 公式的影响小，因而两站点各月 ΔET_{rad} 偏大。

2.3 气象因子对 ET_{rad} 的敏感性分析

根据上述分析，由于辐射项是影响两式差异较大的主要原因，而相对湿度、平均气温、日照时数是计算辐射项的主要指标，因此将各气象指标分别对 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式计算的辐射项的敏感性进行分析，对 18 个站点进行逐月分析并统计，结果如表 3 所示。

由于相对敏感系数表示气候变量的变化所导致的 ET_{rad} 变化，正/负敏感系数表示 ET_{rad} 将与气候变量变化一致/相反，敏感系数越大，变量对 ET_{rad} 的影响越大。从表 3 可以看出，三个气候因子对 $ET_{rad}(P)$ 和 $ET_{rad}(PM)$ 的相对敏感系数差异很大，所有站点 3 个气象因子对月 $ET_{rad}(PM)$ 的相对敏感系数均为正值，而 3 个气象因子对月 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数有部分站点的个别月份出现了负值，例如 1 月，相对湿度对 4 站（安阳、新乡、三门峡、孟津）月 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数为负值，12 月，有 14 站都出现了负值；同样日照时数对 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数也出现了负值，其中 10、11 月，日照时数对所有站点 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数均为负值。

表 3 气象因子对 ET_{rad} 的平均相对敏感系数及统计分析

Table 3 Averagely relative sensitivity coefficient and statistical analysis on ET_{rad} affected by meteorological factors

气象因子	月份	Penman 修正式		Penman-Monteith 公式		气象因子	月份	Penman 修正式		Penman-Monteith 公式	
		站点平均	站点贡献	站点平均	站点贡献			站点平均	站点贡献	站点平均	站点贡献
相对湿度		-9.10	9:9	0.18	18:0	相对湿度		0.46	18:0	0.18	18:0
平均气温	1 月	0.09	18:0	0.00	18:0	平均气温	7 月	1.00	18:0	0.13	18:0
日照时数		11.41	9:9	0.13	18:0	日照时数		0.65	18:0	0.40	18:0
相对湿度		0.63	18:0	0.14	18:0	相对湿度		0.51	18:0	0.19	18:0
平均气温	2 月	0.13	9:9	0.01	18:0	平均气温	8 月	1.04	18:0	0.14	18:0
日照时数		-0.07	9:9	0.24	18:0	日照时数		0.65	18:0	0.41	18:0
相对湿度		0.41	18:0	0.12	18:0	相对湿度		0.46	18:0	0.20	18:0
平均气温	3 月	0.31	18:0	0.02	18:0	平均气温	9 月	0.80	18:0	0.11	18:0
日照时数		0.36	18:0	0.32	18:0	日照时数		0.03	18:0	0.37	18:0
相对湿度		0.38	18:0	0.14	18:0	相对湿度		0.68	12:6	0.22	18:0
平均气温	4 月	0.53	15:3	0.04	18:0	平均气温	10 月	0.74	12:6	0.08	18:0
日照时数		0.49	15:3	0.39	18:0	日照时数		-0.36	18:0	0.32	18:0
相对湿度		0.37	18:0	0.15	18:0	相对湿度		2.02	18:0	0.26	18:0
平均气温	5 月	0.68	18:0	0.07	18:0	平均气温	11 月	0.62	18:0	0.04	18:0
日照时数		0.54	18:0	0.42	18:0	日照时数		-2.91	18:0	0.21	18:0
相对湿度		0.43	18:0	0.16	18:0	相对湿度		-13.26	11:7	0.25	18:0
平均气温	6 月	0.88	18:0	0.11	18:0	平均气温	12 月	-0.33	18:0	0.01	18:0
日照时数		0.66	18:0	0.42	18:0	日照时数		13.73	11:7	0.09	18:0

注：1、由于 Penman-Monteith 公式中 ET_{rad} 的计算并未采用实测平均气温，因此表中平均气温对 ET_{rad} 的相对敏感系数为最高、最低气温对 ET_{rad} 的相对敏感系数均值。2、分别对 18 个站点和站点平均各月影响因子按照数值大小进行排序，站点贡献为各站点影响因子排序同站点平均相一致的数目与不一致的数目比例。

Note: 1、Because the calculation of ET_{rad} in Penman-Monteith equation did not use the actual average temperature, the relative sensitive coefficient of average temperature to ET_{rad} based on Penman-Monteith formula are the averaged values of the maximum and minimum temperature to ET_{rad} in the table. 2、The monthly impact factors in eighteen stations are respectively sequenced according to the numerical size, and the contribution values of station are ratios of consistent numbers to consistent numbers of stations with the impact factor order.

相对湿度、日照时数对 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数季节间变化较大，相对湿度对 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏

感系数各月间变化范围为-13.26~2.0，日照时数对 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数各月间变化范围为-2.91~

13.73。秋、冬季,相对湿度、日照时数对 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数站点间差异较大,1月各站点相对湿度对 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数范围为 $-190.0 \sim 17.27$,日照时数对 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数范围为 $-0.8 \sim 220.0$ 。而相对湿度对 $ET_{rad}(PM)$ 的相对敏感系数各月间变化范围为 $0.12 \sim 0.26$,日照时数对 $ET_{rad}(PM)$ 的相对敏感系数各月间变化范围为 $0.09 \sim 0.42$,且各站点间差异较小,1月各站点相对湿度对 ET_{rad} 的相对敏感系数范围为 $0.16 \sim 0.21$,日照时数对的相对敏感系数范围为 $0.08 \sim 0.17$ 。

将3个气候因素对 ET_{rad} 的相对敏感系数排序,发现两公式的表现相差较大。当3个气候因素对 $ET_{rad}(PM)$ 的相对敏感系数排序时,18个站点均表现为:3个指标中,平均气温对 $ET_{rad}(PM)$ 的影响最小,其他指标与月份有关,1、11、12月相对湿度对 $ET_{rad}(PM)$ 的影响较大,2-10月日照时数对 $ET_{rad}(PM)$ 的影响较大。当3个气候因素对 $ET_{rad}(P)$ 的相对敏感系数排序时,18个站点表现不一致,基本为:1-3月,相对湿度对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较大,4-10月,平均气温对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较大,11-12月,日照时数对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较大;1-3月、11-12月,平均气温对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较小,4-8月相对湿度对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较小,9-10月,日照时

数对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较小;18个站点表现一致的有:2-3月,相对湿度对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较大,5-9月,平均气温对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较大,1月,日照时数对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较大;1、3、11、12月,平均气温对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较小,4-8月,相对湿度对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较小,9-10月,日照时数对 $ET_{rad}(P)$ 的影响较小。

根据以上分析, Penman 修正式作为计算参考作物蒸发蒸腾量辐射项的模型不如 Penman-Monteith 公式效果好,采用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量辐射项时,受季节、站点情况影响小,稳定性高。

3 基于 Penman-Monteith 公式的作物系数

根据上述分析,采用 Penman 修正式和采用 Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量差异较大, Penman 修正式计算参考作物蒸发蒸腾量时,影响因素较多且稳定性较差,与之相比, Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量,结果合理且稳定性较好,因此广大学者都选用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量。

表4 基于 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式的作物系数对比
Table 4 Comparison of crop coefficients based on modified Penman and Penman-Monteith equations

站名	冬小麦								夏玉米							
	播种期	收获期	$ET_0(P)$ /mm	$ET_0(PM)$ /mm	K_{CP}	K_{CPM}	ET_{cP} /mm	ET_{cPM} /mm	播种期	收获期	$ET_0(P)$ /mm	$ET_0(PM)$ /mm	K_{CP}	K_{CPM}	ET_{cP} /mm	ET_{cPM} /mm
安阳	10-12	06-09	449.45	520.55	1.06	0.92	551.79	478.91	06-09	09-19	343.84	371.26	1.16	1.07	430.66	397.25
新乡	10-12	06-09	435.61	511.11	1.06	0.90	541.78	460.00	06-05	09-17	353.26	381.78	1.16	1.07	442.86	408.50
三门峡	10-12	06-07	446.76	532.15	1.04	0.87	553.44	462.97	06-07	09-19	369.31	413.72	0.99	0.88	409.58	364.07
卢氏	10-17	06-04	328.29	398.32	1.04	0.86	414.26	342.56	06-04	09-17	312.10	343.87	0.99	0.90	340.43	309.48
孟津	10-17	06-07	470.76	565.59	1.04	0.86	588.21	486.41	06-05	09-18	357.44	395.84	0.99	0.89	391.88	352.30
郑州	10-17	06-04	442.97	516.69	1.00	0.86	516.69	444.35	06-04	09-16	358.00	387.91	0.99	0.92	384.03	356.88
南阳	10-22	06-02	358.41	389.32	1.02	0.88	425.34	342.60	06-01	09-10	329.23	358.44	1.07	0.98	383.53	351.27
西华	10-19	06-04	378.24	441.05	1.02	0.87	449.87	383.71	05-30	09-12	350.37	374.97	0.99	0.92	371.22	344.97
驻马店	10-22	06-02	371.28	435.58	1.02	0.87	444.29	378.95	05-30	09-11	339.08	368.17	0.99	0.91	364.48	335.03
信阳	10-22	05-30	358.78	428.74	1.1	0.92	471.62	394.44	05-25	09-07	345.53	379.98	0.99	0.90	376.18	341.98
固始	10-22	05-30	356.46	426.40	1.1	0.92	469.03	392.29	05-25	09-07	415.50	387.50	0.99	0.90	383.63	348.75
栾川	10-22	06-04	340.08	421.17	1.04	0.84	438.02	353.78	06-02	09-12	299.92	336.33	0.99	0.88	332.97	295.97
许昌	10-17	06-04	408.32	469.23	1.00	0.87	469.23	408.23	06-02	09-13	343.80	370.62	0.99	0.92	366.91	340.97
开封	10-17	06-04	432.51	508.27	1.00	0.85	508.27	432.03	06-04	09-16	351.80	386.28	0.99	0.90	382.42	347.65
西峡	10-22	06-02	382.88	459.09	1.02	0.85	468.27	390.23	05-30	09-10	335.85	370.77	1.07	0.97	396.72	359.65
宝丰	10-17	06-04	421.82	482.31	1.00	0.87	482.31	419.61	06-02	09-12	332.55	360.56	0.99	0.91	356.96	328.11
商丘	10-17	05-30	361.94	424.77	1.00	0.85	424.77	361.05	06-01	09-12	323.26	349.84	0.99	0.91	346.46	318.35
洛阳	10-17	06-07	388.52	459.70	1.04	0.88	478.09	404.54	06-05	09-18	334.88	360.37	0.99	0.92	356.77	331.54
平均			396.28	466.11			483.07	407.59			344.21	372.12			378.76	346.26

注:1、为方便计算,表中冬小麦、夏玉米生育日期各年相同,具体日期根据实际调研获取。2、 K_{CP} 、 K_{CPM} 分别为基于 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式的作物系数; ET_{cP} 、 ET_{cPM} 分别为 K_{CP} 、 K_{CPM} 与 $ET_0(PM)$ 的乘积。

Note: 1、The growing date of winter wheat and summer maize is obtained through actual survey, and the yearly values of $ET_0(P)$ and $ET_0(PM)$ are calculated using the same growing date. 2、 K_{CP} and K_{CPM} indicate crop coefficients based on modified Penman equation and Penman-Monteith equation respectively, and ET_{cP} and ET_{cPM} respectively represent the product of K_{CP} , K_{CPM} and $ET_0(PM)$.

中国上世纪 90 年代曾对全国主要作物作物系数进行过统计整理, 大量的研究表明, 尽管不同生育阶段作物系数年际间不稳定, 但全生育期的作物系数年际间还是比较稳定的^[10]。由于该作物系数^[11]是基于 Penman 修正式的结果, 若直接采用其与 Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量相乘来计算作物需水量, 会导致作物需水量偏高(表 4), 因此当采用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量时, 需要对基于 Penman 修正式的作物系数进行校正。由于很多试验站是在 20 世纪 80 年代才开展相关试验工作, 缺乏实测的作物需水资料, 而应用 Penman 修正式估算冬小麦需水量值与用水量平衡法实测值比较, 相对误差在 10% 左右^[12], 因此对缺乏实测需水量的年份假定应用 Penman 修正式估算的需水量值即为实际需水量, 则基于 Penman-Monteith 公式的作物系数计算公式如下

$$K_{CPM} = \frac{ET_c}{ET_0(PM)} \approx \frac{ET_0(P) \times K_{CP}}{ET_0(PM)} \quad (12)$$

式中, ET_c 为实际需水量; $ET_0(P)$ 、 $ET_0(PM)$ 分别为基于 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量; K_{CP} 、 K_{CPM} 分别为基于 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式的作物系数; K_{CP} 参考文献^[11]的结果。

从表 4 中可以看出, 若作物系数不加校正直接采用, 河南省冬小麦年 ET_c 平均 483.07 mm, 夏玉米平均 378.76 mm, 校正后冬小麦年 ET_c 平均 407.59 mm, 夏玉米平均 346.26 mm, 冬小麦年 ET_c 减少约 75.5 mm, 夏玉米减少约 33.5 mm, 表明作物系数的校正对冬小麦影响较大, 夏玉米影响较小; 各站冬小麦年 ΔET_0 平均 70 mm, 夏玉米年 ΔET_0 平均 28 mm, 表明采用两公式计算作物全生育期 ET_0 时, 对冬小麦的影响高于夏玉米。这一现象的产生可能是: 采用 Penman-Monteith 公式计算的月 ET_0 值高于 Penman 修正式计算结果, ΔET_0 均大于 0, 冬小麦生育期较夏玉米长, 全生育期冬小麦 ΔET_0 累计值高于夏玉米; 冬季采用 Penman 修正式计算的月 ET_0 值偏低, 且存在负值的可能, ΔET_0 高于夏季, 因此在作物系数不变的前提下, 如果采用 Penman-Monteith 代替 Penman 修正式计算 ET_0 时, 对冬小麦需水量估算的影响高于夏玉米。

4 讨 论

20 世纪 90 年代, 中国采用 Penman 修正式计算 ET_0 取得了大量的成果, 并绘制了 ET_0 的等值线图。自 1990 年 FAO 推荐用 Penman-Monteith 公式计算 ET_0 ^[13]以来, 国内外许多学者通过实测、计算

等方法比较了两公式在计算 ET_0 的不同, 并一致认为 Penman-Monteith 公式是计算 ET_0 最好的一种计算方法^[14-16]。不同地方两种方法的计算结果表现不同, 两种计算结果差异的影响因素与季节有关。龚元石采用两方法计算了北京地区的参考作物蒸发蒸腾量, 认为采用 Penman 修正式计算的结果大于 Penman-Monteith 公式的计算结果, 春夏季, 辐射项是导致两种计算结果差异的主要因素, 秋冬季, 空气动力学为主要影响因素^[17]。张文毅利用关中中部地区 3 个气象站 41 年月气象资料计算结果与之不同, 认为用 Penman-Monteith 公式计算的 ET_0 年值大于用 Penman 修正式计算的 ET_0 年值, 春夏季, 空气动力项的不同处理是引起 ET_0 结果差异的主要原因, 秋冬季是由于辐射项的处理不同引起^[18]。胡顺军对塔里木盆地的研究表明, 采用 Penman 修正式计算的参考作物潜在腾发量年值略大于 Penman-Monteith 公式计算的年值^[19]。由此可见, Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式在不同地方表现不同, 春夏和秋冬主要影响因子各异, 但对 ET_0 年值而言, 都认为两种计算式计算结果的差异主要归于辐射项, 空气动力项次之。本文采用两公式比较河南省 18 个气象站多年平均月 ET_0 计算结果表明, 采用 Penman-Monteith 公式计算的月 ET_0 均高于同月 Penman 修正式的计算结果, 秋冬季, 辐射项为主要影响因子, 春夏季, 风速是影响辐射项与空气动力学项比例分配的一个重要因素, 较高的风速可能导致空气动力学项的影响高于辐射项^[20], 总体而言, 辐射项是引起两公式计算结果差异的主要原因。

刘钰对河北北部地区的研究发现, 采用 Penman 修正式计算 ET_0 时, 在冬季出现 $R_n < 0$ 的现象^[3]。本研究表明, 部分站点 1 月和 12 月采用 Penman 修正式计算的 ET_{rad} 出现了负值。分析认为可能是由于平均气温、日照时数、相对湿度三因子共同影响了 F 值的大小所致。

5 结 论

根据河南省 18 个气象站点资料, 采用 Penman-Monteith 公式计算的月 ET_0 、 ET_{rad} 值均高于采用 Penman 修正式计算的月 ET_0 、 ET_{rad} 值, 两公式中辐射项处理的不同是引起差异的主要原因, 秋冬季, 采用两公式计算的月 ET_0 、 ET_{rad} 值差异均高于春夏季, 空气动力学项对 ET_0 值的影响与风速有关, 较高的风速可能导致空气动力学项的影响高于辐射项。

敏感性分析方法可作为评价模型稳定性的一个参考方法。Penman 修正式作为计算参考作物蒸

发蒸腾量辐射项的模型不如 Penman-Monteith 公式效果好, 采用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量辐射项时, 受季节、站点情况影响小, 稳定性高。18 站均表现为: 平均气温对 ET_{rad} 的影响最小, 1、11、12 月相对湿度对 ET_{rad} 的影响较大, 2—10 月日照时数对 ET_{rad} 的影响较大。

辐射项除受相对湿度、平均气温、日照时数 3 因子影响外, 站点高程的高低对其也有影响, 对高程较高站点, Penman-Monteith 公式受高程的影响高于 Penman 修正式。

采用 Penman-Monteith 代替 Penman 修正式计算河南省 ET_0 时, 一定要对作物系数进行校正, 否则将导致需水量偏高的结果, 并且对生育期较长的越冬作物的影响要高于生育期较短的夏季作物。

[参 考 文 献]

- [1] Frere M, Popov G F. Agrometeorological Crop Monitoring and Forecasting[M]. Rome: FAO Plant Production and Protection Paper 17, 1979.
- [2] 时学双, 曹红霞, 李天军. 基于 Penman-Monteith 公式的关中地区作物系数研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 26—29.
Shi Xueshuang, Cao Hongxia, Li Tianjun. Crop coefficient on the penman-monteith formulae in guanzhong Shaanxi[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2): 26—29. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘钰, Pereira L S, Teixeira J L, 等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997, 28(6): 27—33.
Liu Yu, Pereira L S, Teixeira J L, et al. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(6): 27—33. (in Chinese with English abstract)
- [4] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993, 2—6.
- [5] 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004, 30—35.
- [6] 王懿贤, 赵名茶. 中国旬总辐射的空间分布特征与光合潜力[J]. 自然资源, 1981(3): 32—41.
Wang Yixian, Zhao Mingcha. Spatialization research on decade global radiation and photosynthetic potential productivity[J]. Natural Resources, 1981(3): 32—41. (in Chinese with English abstract)
- [7] Hupet F, Vanclooster M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology, 2001, 243(3/4): 192—204.
- [8] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. Physica and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9/10): 645—654.
- [9] 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(增刊): 128—136.
Mao Fei, Zhang Guangzhi, Xu Xiangde. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of their results[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11(Supp.): 128—136. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈玉民. 关于作物系数的研究及新进展[J]. 灌溉排水, 1987, 6(2): 1—7.
Chen Yumin. A study on the crop coefficients and its new development[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1987, 6(2): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 76—80.
- [12] 陈玉民, 华佑亭, 张鸿, 等. 华北地区冬小麦需水量图与灌溉需水量评价研究[J]. 水利学报, 1987(11): 10—20.
Chen Yumin, Hua Youting, Zhang Hong, et al. Isogram of water requirement for winter wheat and evaluation of irrigation demand in the north plain of China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(11): 10—20. (in Chinese with English abstract)
- [13] Smith M. Report on the Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirement. Land and Water Development Division[M]. FAO Rome: 1991: 54.
- [14] Allen R G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration[J]. Agronomy Journal, 1989, 81(4): 650—662.
- [15] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements[R]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.70, 1990: 332.
- [16] 强小嫻, 蔡焕杰, 孙景生, 等. 陕西关中地区 ET_0 计算公式的适用性评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 121—127.
Qiang Xiaoman, Cai Huanjie, Sun Jingsheng, et al. Adaptability evaluation for reference evapotranspiration formulas in Guanzhong Region of Shaanxi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20): 121—127. (in Chinese with English abstract)
- [17] 龚元石. Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17 Penman 修正式计算参考作物蒸散量的比较[J]. 北京农业大学学报, 1995, 21(1): 68—75.
Gong Yuanshi. Comparison of the reference evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith and FAO-PPP-17 Penman Methods[J]. Journal of China Agricultural University, 1995, 21(1): 68—75. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张文毅, 党进谦, 赵璐. Penman-Monteith 公式与 Penman 修正式在计算 ET_0 中的比较研究[J]. 节水灌溉, 2010(12): 54—59.
Zhang Wenyi, Dang Jinqian, Zhao Lu. Comparison of

ET_0 estimated by penman-monteith and modified penman methods[J]. *Water Saving Irrigation*, 2010(12): 54–59. (in Chinese with English abstract)

[19] 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.

Hu Shunjun, Pan Yu, Kang Shaozhong, et al. Comparison of the reference crop evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith and Penman methods in Tarim River basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of*

Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 30–35. (in Chinese with English abstract)

[20] 霍再林, 史海滨, 陈亚新, 等. 内蒙古地区 ET_0 时空变化与相关分析[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 60–63.

Huo Zailin, Shi Haibin, Chen Yaxin, et al. Spatio-temporal variation and dependence analysis of ET_0 in north arid and cold region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(6): 60–63. (in Chinese with English abstract)

Analysis of difference in crop coefficients based on modified Penman and Penman-Monteith equations

Song Ni^{1,2}, Sun Jingsheng^{1,2}, Wang Jinglei^{1,2*}, Chen Zhifang^{1,2}, Qiang Xiaoman^{1,2}, Liu Zugui^{1,2}

(1. *Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;*

2. *Key Laboratory for Crop Water Use and Regulation, Ministry of Agriculture, Xinxiang 453002, China)*

Abstract: Aiming at the main problem that existed in estimating the crop water requirement through multiplying the crop coefficients of main crops determined in the early 1990s by ET_0 calculated using the Penman-Monteith equation, the reasons for crop coefficients which need to be revised were analyzed. There is a significant difference in ET_0 calculated by using the modified Penman equation and by Penman-Monteith equation, which affects overwintering crops with a longer growth period of greater than summer crops with a shorter growth period. The result showed that the monthly ET_0 and ET_{rad} calculated by using Penman-Monteith equation were higher than that by modified Penman equation, and the difference between radiation terms was the main reason that caused the difference between the calculation results by using two equations based on the meteorological data of 18 stations in Henan province. The difference of monthly ET_0 and ET_{rad} calculated by two equations in autumn and winter was higher than in spring and summer. The effect of aerodynamic term on ET_0 was related to wind speed, and the reason that the effect of aerodynamic term on ET_0 is higher than the radiation term maybe caused by high wind speed. Except for the relative humidity, average temperature and sunshine hours, radiation term was affected by the elevation of stations, as for the stations with a higher elevation, the impact of elevation on Penman-Monteith equation was greater than that on modified Penman equation. Using the sensitivity analysis method to evaluate the effect of average air temperature, relative humidity and sunshine hours on ET_{rad} showed that Penman-Monteith equation was better than modified Penman model in calculating ET_{rad} . The ET_{rad} calculated through Penman-Monteith equation was little influenced by seasons and stations, and had a high stability. The results from 18 stations showed that the effect of average temperature on ET_{rad} was the minimal, the impact of relative humidity in January, November and December on ET_{rad} was larger, and the influence of sunshine hours from February to October on ET_{rad} was also greater. Therefore, ET_0 in Henan Province was calculated by Penman-Monteith equation instead of modified Penman equation, crop coefficients must be corrected, otherwise it caused the estimated values of crop water requirement to be higher, and its impact on overwintering crops with a longer growing period was greater than that on summer crops with a shorter growth period. Finally, according to the relationship between two difference methods of estimating ET_0 , the correction method of crop coefficient based on Penman-Monteith equation was proposed. This study has an important significance in improving the estimation precision of crop water requirement.

Key words: evapotranspiration, crops, meteorology, modified Penman equation, Penman-Monteith equation, crop coefficient

(责任编辑: 曾懿婷)