

Applicability of Four Combination Methods for Reference Crop Evapotranspiration in China's Main Agricultural Areas

Jinfeng Cao, Yuzhong Li, Xiaoying Liu*, Xiuli Zhong, Yemeng Zhao

Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key laboratory of Dry Land Agriculture, MOA, Beijing
Email: bameixiu@126.com, liuxiaoying@caas.cn

Received: September 2014

Abstract

Accurate estimation of reference crop evapotranspiration (ET_0) is critical for computation of crop water requirement. The currently numerous ET_0 methods, which bring convenience for computing water requirement, cause confusion in method choice. Using data from six sites in main agricultural areas in China and with FAO 56 Penman-Monteith (PM) as reference, four commonly used combination methods were assessed. Results showed that the 1963 Penman, FAO-ppp-17 and 1996 Kimberly Penman overestimated the PM by 0.28, 0.52 and 0.14 mmd^{-1} (averaged over six sites), respectively, corresponding to 16.0%, 25.2% and 2.4%. In contrast, the FAO 24 underestimated the PM by 0.17 mmd^{-1} or -5.3%. Overall, daily ET_0 of the four methods differed significantly from that of the PM, and their performance based on RMSE showed the order: FAO 24 > Pen63 > Kpen > FAO-ppp-17, which varied among southern and northern sites: the 1963 Penman was the best at northern sites and the FAO 24 was the best at southern sites. In addition, validity of the 1963 Penman was the best, and that of the FAO-ppp-17 was the poorest, implying the importance to evaluate the latter before use. As a whole, the four methods performed poorer at the northern sites than that at the southern ones, and they gave best performance at Shapingba and poorest at Haerbin, meaning that the Penman and its derivative versions are more applicable in humid climates. Daily comparison at each month indicated that mean bias error (MBE) was larger at summer months and smaller at winter months, but it was opposite for relative error (RMBE). Total solar radiation, net radiation and humidity are the most important factors influencing performance of the four methods.

Keywords

Reference Crop Evapotranspiration, FAO-ppp-17, Penman-Monteith, Kimberly Penman, Combination Methods, China's Main Agricultural Area

*通讯作者。

四种参考作物蒸散量综合法在我国农业主产区的适用性

曹金峰, 李玉中, 刘晓英*, 钟秀丽, 赵叶萌

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京
Email: bameixiu@126.com, liuxiaoying@caas.cn

收稿日期: 2014年9月

摘要

参考作物蒸散量(ET_0)的准确估算是作物需水量计算的关键。目前的许多 ET_0 方法在为需水量估算带来便利的同时, 也造成选择上的困惑。本文利用我国农业主产区六个站点的数据, 以FAO 56 Penman-Monteith (PM)为标准, 评价了国内外常用的四种综合法的适用性。结果表明, 1963 Penman、FAO-ppp-17及1996 Kimberly penman都高估PM, 在六站点平均高估0.28 mmd^{-1} 、0.52 mmd^{-1} 和0.14 mmd^{-1} , 相当于16.0%、25.2%和2.4%; 而FAO 24 penman低估PM, 六站点平均-0.17 mmd^{-1} , 相当于-5.3%。总体上, 四种综合法与PM间的日值差异显著。依据RMSE(均方根误差)的吻合程度排序为: FAO 24 > 1963 Penman > 1996 Kimberly penman > FAO-ppp-17, 但南、北方站点有差异: 北方站点1963 Penman与PM最吻合, 南方站点FAO 24与PM最吻合。此外, 1963 Penman的普适性最好, FAO-ppp-17最差, 故应用前对其评价更重要。四种综合法在北方站点表现较差, 在南方站点较好, 其中在沙坪坝适用性最好, 在哈尔滨最差, 表明Penman法及其衍生的多种综合法在湿润气候下适用性更好。逐月日 ET_0 比较显示, 绝对差值在夏季月份较大、冬季月份较小, 但相对差值则是夏季月份较小、冬季月份较大。影响四种综合法与PM差异的关键因子为总辐射、净辐射和相对湿度。

关键词

参考作物蒸散量, FAO-ppp-17, Penman-Monteith, Kimberly Penman, 综合法, 农业主产区

1. 引言

作物蒸散量/需水量是农田水分循环的重要组成部分, 目前有多种测定手段, 但由于成本问题, 基于参考作物蒸散量(ET_0)的间接估算, 即作物系数乘以 ET_0 的方法[1]仍是主流, 使 ET_0 成为影响作物需水量准确估算的关键。

过去已提出很多类 ET_0 方法, 每一类中又有若干方法, 十分繁杂。根据计算原理及输入数据的不同, 这些方法大致划分为综合法[2] [3]、辐射法[4]、温度法[5] [6]和蒸发皿法[7]。目前每类方法都有一定应用, 但一般认为Penman类综合方法估算精度最好[8], FAO也向全球推荐了Penman-Monteith (PM)法为计算 ET_0 的标准方法[1]。

综合法基于1948年提出的Penman [2]公式, 该式针对英格兰南部的气候和试验而建立, 最初用于描述开阔水面的自由蒸发。综合法的计算原理十分复杂, 涉及到大气能量传输、地表能量平衡以及水汽扩散的空气动力学原理。因此, 在诸多 ET_0 估算方法中, 围绕综合法的研究最活跃, 并进一步衍生出多种版本。例如, Dorenbos & Pruitt [9]对Penman公式中风函数的改进形成较有影响的FAO 24 Penman; Frère

& Popov [10]对 Penman 式中风函数的修正衍生出 FAO-ppp-17 公式; Monteith [3]通过引入水汽扩散的冠层阻力形成著名的 PM 公式; Wright & Jensen 在美国 Kimberly, Idaho 对 Penman 公式的研究衍生出 1972、1982 以及 1996 Kimberly Penman 公式[11]-[13]。

综合法多版本的出现, 虽为实际应用带来了便利, 但由于气候的多样性及复杂性, 加之对这些版本缺乏检验, 实际中做出合理选择并非易事, 导致方法选择的困惑及任意性。而且, 目前关于综合法的评价结果很不一致, 国内学者龚元石[14]、杜尧东[15]及张文毅[16]的研究, 国外学者Howell等[17]、Yoder等[18]、Nandagiri and Kovoov [19]的研究都反映了这一点。这些问题不仅增加了研究结果的不确定性, 导致夸大实际用水或对其估计不足, 也影响了对水资源相关科学问题的正确阐释。本文利用我国农业主产区六个站点近60年的数据, 评价了国内外常用的四种综合方法, 旨在为作物用水及农业水资源规划管理提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 综合法公式

评价的方法包括1963 Penman [20]、FAO-ppp-17 Penman、FAO 24 Penman以及1996 Kimberly Penman, 下文分别简称为Pen63、FAO-ppp-17、FAO 24及Kpen。这些方法都以供水良好的草为试验建立。

1963 Penman具体公式[8]为:

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + K_w \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (a_w + b_w u_2) (e_s - e_a) \quad (1)$$

式中 ET_0 为参考作物蒸散量(mmd^{-1}); R_n 为净辐射($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$), 本文取 $G = 0$; Δ 为饱和水汽压~气温关系斜率($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); γ 为干湿计常数($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); K_w 为单位转换系数($= 6.43$); a_w 、 b_w 为风函数系数; u_2 为2 m高度风速(ms^{-1}); e_s 、 e_a 为饱和、实际水汽压(kPa)。

FAO-ppp-17 [10]公式形式与(1)相同, 但风函数系数为依赖于温差 (ΔT) 的分段函数:

$$b_w = \begin{cases} 0.54 & \Delta T < 12^\circ\text{C} \\ 0.54 + 0.35(\Delta T - 12)/4 & \Delta T \geq 12^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

FAO 24是Doorenbos & Pruitt [9]对Penman公式的一个修正版本, 其不仅使用了更为敏感的风函数, 还引入了修正系数 c 。具体公式为:

$$ET_0 = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 2.7(1 + 0.864u_2)(e_s - e_a) \right] \quad (3)$$

式中 c 的计算很复杂, 除需要最大相对湿度和总辐射外, 还需要日间及夜间风速。后人围绕 c 又有较多修正, 致使其越来越复杂。因此实际中采用 $c \neq 1$ 的情况不多, 本文取 $c = 1$ 。

1996 Kimberly Penman基于美国Idaho、Kimberly的数据, 使用了时变的风函数系数:

$$\begin{aligned} a_w &= 0.3 + 0.58 \exp \left(- \left(\frac{J - 170}{45} \right)^2 \right), \\ b_w &= 0.32 + 0.54 \exp \left(- \left(\frac{J - 228}{67} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 J 为儒历日。

FAO 56 PM [1]是在Jensen等[8]的研究基础上, 经过FAO专家小组讨论向全球推荐的方法。该法是对

原始PM式的简化, 将反映下垫面特性的参数如株高、叶面积指数及冠层阻力固定下来。具体公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5)$$

式中 T 为平均气温($^{\circ}\text{C}$), 其它符号同前。

2.2. 相关变量的估算

除特别说明, 本文所有相关变量及辅助参数的估算主要依据FAO 56的方法[1]。总辐射 R_s 是综合法计算 ET_0 时最重要的估算变量, 本文估算时模型参数全部采用刘晓英等[21]的校正值。反射率在Pen63中取值0.25, 其他方法均为0.23。由于使用校正的辐射参数, 晴空辐射 R_{s0} 的计算也不同于FAO 56, 具体计算见Liu *et al.* [22]。此外, 不同综合法对 e_s 的计算也不同。早期版本使用平均温度计算, 近期的PM及Kpen则通过先计算最高、最低再取平均值的方法。

2.3. 站点及数据

选择我国粮食主产区六个站点近60年的长系列数据(表1), 包括哈尔滨、乌鲁木齐、北京、南京、武汉、重庆沙坪坝, 使用日数据进行评价。实测气象要素包括最高、最低温度, 风速, 日照, 平均相对湿度、大气压, 由中国气象局气候资料中心提供。

2.4. 评价方法与指标

由于 ET_0 实测值获取困难, 用一种公认的准确方法去评价其它方法是国际上常用手法, 目前多使用FAO 56 PM作为标准[7]。本文也使用这种方法。评价指标包括决定系数 R^2 、平均偏差MBE、平均相对偏差RMBE、均方根误差RMSE以及 t 统计量。具体计算公式参阅Liu *et al.*[21]。

3. 结果分析

3.1. 综合法与 PM 的日 ET_0 比较

图1为四种综合法在六个站点的日估算值与PM估算值的比较。显见, Pen63与PM的一致性最好, 表现在其 R^2 最高(0.992~0.998), 斜率也最接近于1(1.027~1.081)。相反, Kpen与PM的一致性最差, 但在哈尔滨是例外, 此站点FAO-ppp-17与PM的一致性最差。图1还表明, 除FAO 24比PM估算值偏低以外, 其他三种方法都高估, 尤以FAO-ppp-17的高估最严重。

Table 1. Characteristics of the studied sites

表 1. 站点基本信息

站名	纬度/ $^{\circ}\text{N}$	经度/ $^{\circ}\text{E}$	海拔/ m	多年平均					资料年限
				降水/ mm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	温差/ $^{\circ}\text{C}$	日照/ h	相对湿度/ $\%$	
哈尔滨	45.75	126.77	142.3	634	4.39	11.34	2528	66	1951~2010
乌鲁木齐	43.78	87.62	917.9	267	7.57	10.27	2676	58	1955~2010
北京	39.80	116.47	31.3	588	12.48	10.81	2669	57	1951~2010
南京	32.00	118.80	8.9	1061	16.10	8.67	2043	76	1951~2010
武汉	30.62	114.13	23.1	1260	17.30	8.15	1964	77	1951~2010
沙坪坝	29.58	106.47	259.1	1096	18.94	6.60	1097	80	1952~2010

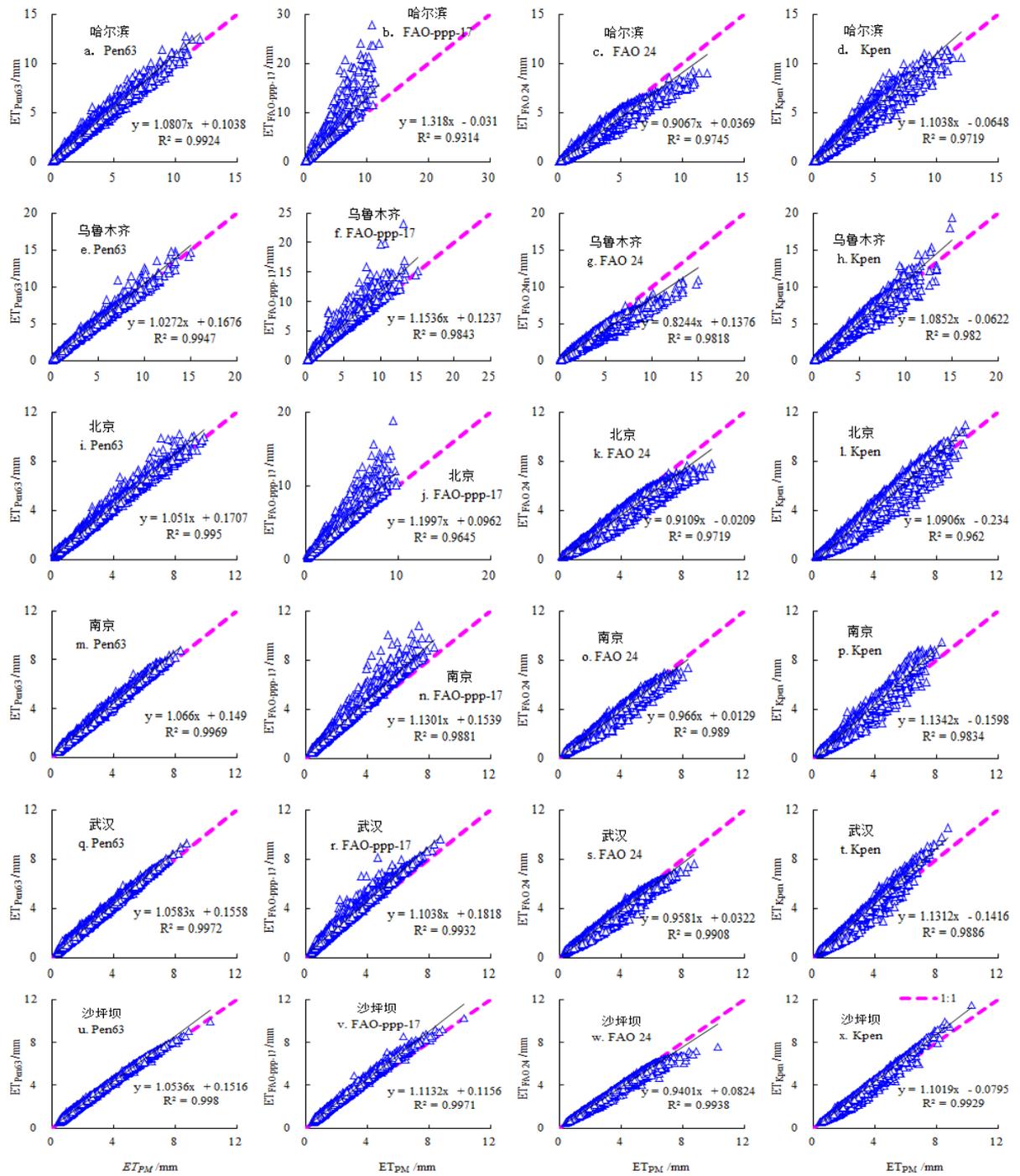


Figure 1. Comparison of daily ET_0 between PM and combination methods

图 1. ET_0 综合法与 PM 计算的日值比较

综合法与 PM 日值比较的统计特征值(图 2)同样表明, Pen63 及 FAO-ppp-17 都高估 PM, 前者的高估在 $0.25\sim 0.31\text{ mmd}^{-1}$ 之间, 六个站点平均 0.28 mmd^{-1} , 相应 RMBE 为 16.0%; 后者高估在 $0.35\sim 0.68\text{ mmd}^{-1}$ 之间, 六个站点平均 0.52 mmd^{-1} , 相应 RMBE 为 25.2%。Kpen 的高估程度小于 Pen63 及 FAO-ppp-17, 在 $0.02\sim 0.19\text{ mmd}^{-1}$ 之间, 六个站点平均 0.14 mmd^{-1} , 相应 RMBE 为 2.4%。四种方法中只有 FAO 24 低

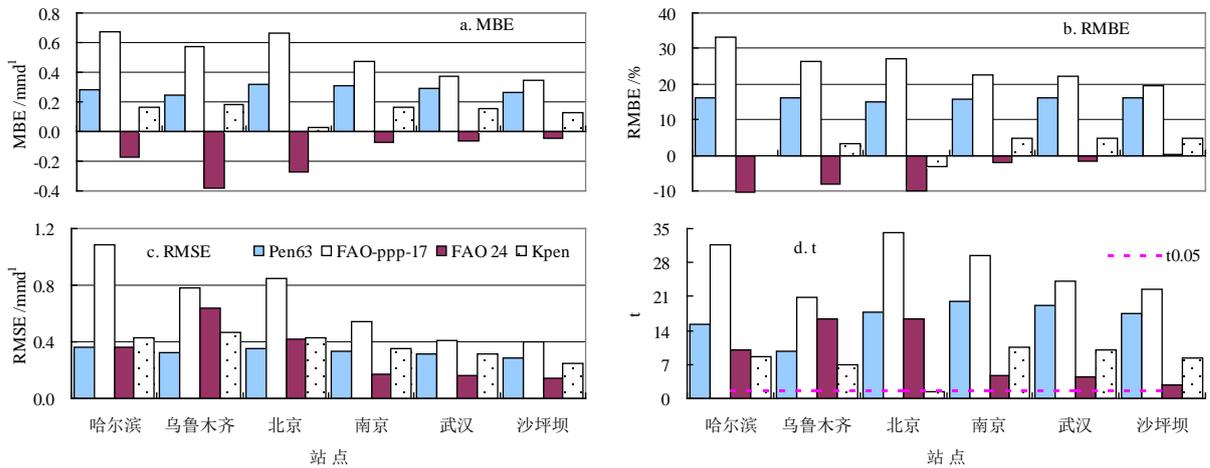


Figure 2. Statistics comparing daily ET_0 between PM and combination methods (Data pair is 20454~21915)

图 2. ET_0 综合法与 PM 日值比较的统计特征值(数据样本为 20454~21915)

估 PM, 范围在 $-0.04 \sim -0.38 \text{ mmd}^{-1}$ 之间, 六个站点平均为 -0.17 mmd^{-1} , 相应 RMBE 为 -5.3% 。可见, 依据 MBE 及 RMBE 的排序为 $Kpen > FAO 24 > Pen63 > FAO-ppp-17$ 。

然而, 根据 RMSE(图 2c)上述排序发生变化。其中 FAO 24 表现最好, RMSE 为 $0.14 \sim 0.64 \text{ mmd}^{-1}$, 六站点平均 0.32 mmd^{-1} ; 其次为 Pen63, RMSE 为 $0.28 \sim 0.36 \text{ mmd}^{-1}$, 平均 0.33 mmd^{-1} , 与 FAO 24 极为接近; 再次为 Kpen, RMSE 为 $0.24 \sim 0.47 \text{ mmd}^{-1}$, 平均 0.37 mmd^{-1} ; FAO-ppp-17 表现最差, RMSE 为 $0.40 \sim 1.08 \text{ mmd}^{-1}$, 平均 0.69 mmd^{-1} , 特别在哈尔滨, RMSE 高达 1.08 mmd^{-1} 。由于很大的高估与低估有相互抵消作用, 可导致很小的 MBE, 这将掩盖方法之间真正的差异。因此依据 RMSE 的排序更可靠。

四种综合法的普适性不同, 其中 Pen63 及 Kpen 优于 FAO-ppp-17 及 FAO 24, 这从 RMBE 和 RMSE 在不同站点的波动反映出来。Pen63 在应用效果最好与最差站点的 RMBE 分别为 15% 和 16.3% , RMSE 分别为 0.28 和 0.36 mmd^{-1} ; Kpen 在应用效果最好与最差站点的 RMBE 分别为 -0.1% 、 4.9% , RMSE 分别为 0.24 、 0.47 mmd^{-1} ; 两个指标在站点间的波动较小。相反, FAO-ppp-17 在应用效果最好与最差站点的 RMBE 分别为 19.7% 、 33.4% , RMSE 分别为 0.40 、 1.08 mmd^{-1} ; FAO 24 在应用效果最好与最差站点的 RMBE 分别为 -0.1% 、 -10.2% , RMSE 分别为 0.14 、 0.64 mmd^{-1} , 两个指标在站点间的波动较大。因此, 使用前对 FAO-ppp-17 及 FAO 24 的评价更为重要。

由于站点间气候差异, 每种方法的适用性地域差异明显。例如 Pen63 在乌鲁木齐应用效果最好, 在北京最差; FAO-ppp-17 在沙坪坝应用效果最好, 在哈尔滨最差; FAO 24 在沙坪坝应用效果最好, 在乌鲁木齐最差; Kpen 在北京应用效果最好, 在乌鲁木齐最差。就空间表现而言, 北方站点 Kpen 的适用性最好, 平均 MBE 和 RMBE 分别为 0.13 mmd^{-1} 、 -0.02% ; 而南方站点 FAO 24 的适用性最好, 平均 MBE 和 RMBE 分别为 -0.06 mmd^{-1} 、 -1.14% 。但总体上, 所有综合法在南方站点的适用性优于北方, 其中在沙坪坝表现最好, 而在哈尔滨最差。可见, Penman 综合法及其衍生出的多种版本更适用于湿润气候。 t 检验(图 2(d))表明, 四种综合法与 PM 的 ET_0 日值差异显著。但在北京 Kpen 与 PM 无显著差异 ($t = 1.3 < t_{0.05} = 1.645$)。

3.2. 综合法与 PM 的逐月日 ET_0 比较

为进一步了解综合法与 PM 在不同月份的差异, 把不同年份、同一月份的日值构成新样本分析。逐月 MBE(图 3a~图 3f)表明, Pen63 及 FAO-ppp-17 在所有站点的所有月份都高估 PM, 且后者比前者高估

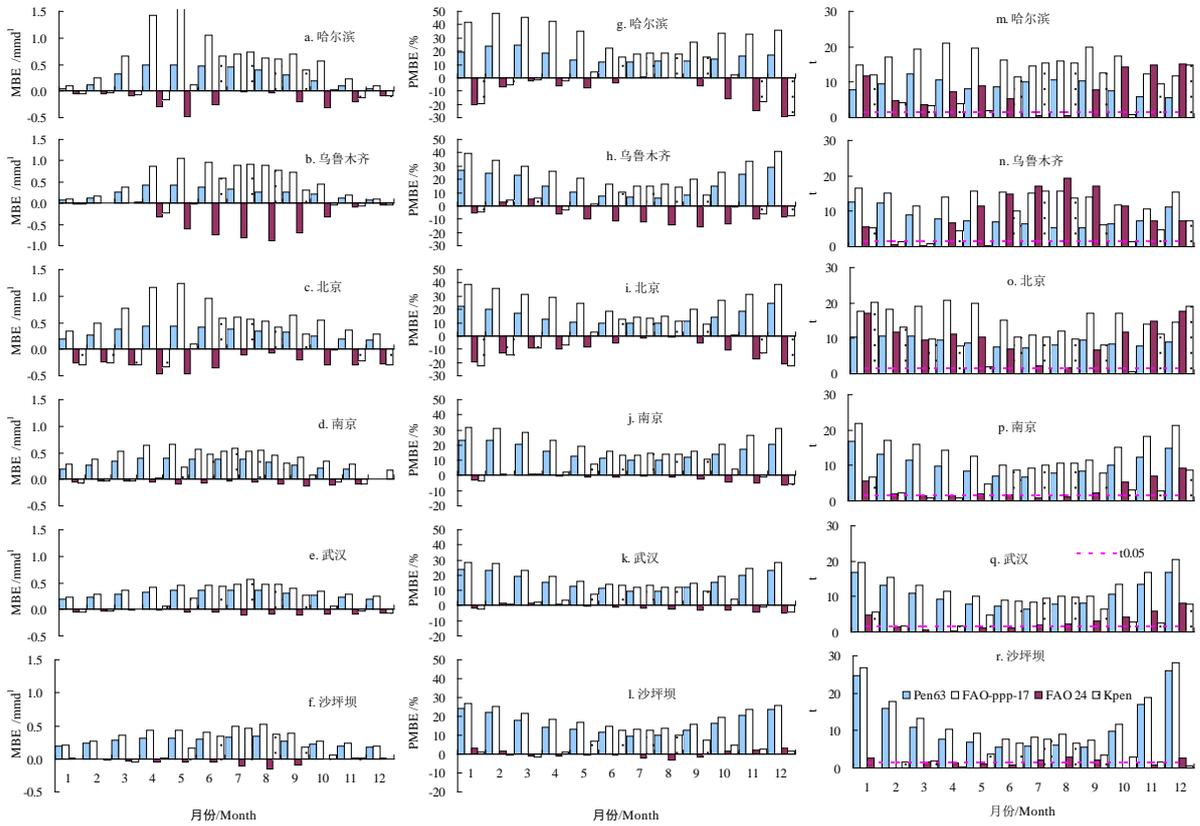


Figure 3. Monthly MBE, RMBE and *t*-test for daily values of PM and combination methods
图 3. ET₀ 综合法与 PM 日值比较的逐月 MBE、RMBE 及 *t* 检验

幅度大。就站点而言，在哈尔滨高估最严重，其次为北京、乌鲁木齐。相比之下，南方站点高估都较小。就月份而言，4~6月高估较大，但以5月最大，如 Pen63 在哈尔滨、乌鲁木齐、北京分别平均高估 0.49、0.43、0.44 mmd^{-1} ，FAO-ppp-17 在这些站点 5 月份高估更是达到 1.68、1.05、1.24 mmd^{-1} ；5 月份 Pen63 在南京、武汉、沙坪坝分别高估 0.40、0.35、0.31 mmd^{-1} ，FAO-ppp-17 则高估 0.66、0.51、0.43 mmd^{-1} 。FAO 24 以低估为主，且在南方站点低估幅度很小，多在 -0.1 mmd^{-1} 以内；但在北方的哈尔滨、北京低估较多，其中低估最大的 5 月为 -0.47 mmd^{-1} ；在乌鲁木齐低估更多，达到 $-0.60 \sim -0.88 \text{ mmd}^{-1}$ ，且涉及长达 5 个月(5~9 月)，其中 8 月份低估最大。Kpen 则既有高估、也有低估月份，且高估月份多在夏半年，低估月份在冬半年。显见，Kpen 的高估幅度远大于其低估幅度，其中 7 月份最大，自北向南站点的 MBE 依次为：0.74、0.90、0.59、0.59、0.56、0.46 mmd^{-1} ，相应 RMBE 为 12.8~18.8%。

从 RMBE 来看，综合法与 PM 日值差异在年内分布为 U 型(图 3g~图 3l)，且 6~8 月最小，冬季月份较大，这是因为冬季月份 ET₀ 相对较小造成的。其中 Pen63 在哈尔滨、北京的 6 月 RMBE 最小，为 12%、9.4%；在乌鲁木齐的 8 月最小，为 6.1%；在南方站点的 7 月最小，为 9.6%~9.9%。Pen63 在所有站点的 1~3 及 11~12 月份、FAO-ppp-17 在所有站点的 1~4 及 10~12 月份的高估程度多在 20% 以上。FAO-ppp-17 在所有站点的 7 月低估最小，在 13.0%~17.6% 之间，且自北向南有减小趋势。FAO 24 在南方站点的低估不大，多在 5% 以内，且很多月份不到 2%；而在北方站点的 3~9 月低估多在 10% 以内，但乌鲁木齐是例外。Kpen 与 PM 日值差异逐月分布较为复杂，其中 6~9 月高估严重，所有站点均在 10%~19% 之间，而冬季月份低估严重，特别在北方站点，有些接近 -30%。

综合法与 PM 逐月日值比较的 *t* 检验(图 3m~图 3r)显示，Pen63 及 FAO-ppp-17 与 PM 在所有站点的

所有月份差异均显著，而 FAO 24 在南方站点有 4~6 个月与 PM 无显著差异，且多在上半年。

3.3. 综合法与 PM 差异的关键影响因子

图 4 表明，在相关的方向上，Pen63、Kpen、FAO-ppp-17 表现出较好的一致性，即这三种方法与 PM 的吻合程度与大气压、相对湿度、降水多为负相关，与其他因子为正相关，表明在低海拔区及较湿润地区吻合程度高。影响四种方法与 PM 吻合度最大的关键因子为 R_s 、 R_n (图 4a、b、d)，说明总辐射和净辐射水平越高，这些方法与 PM 的差异越大，选用综合方法时越需要谨慎。这与 2.1 中南方站点表现好、北方站点表现差是一致的。

从图 4(c)表面上看，FAO 24 在相关方向上与上述方法趋势相反。但仔细分析就会发现，该趋势实质上与图 4(a)、(b)、(d)是一致的。因为 FAO 24 低估 PM，即其 $MBE < 0$ 。因为 MBE 低于 0 的幅度越大，在数学上 MBE 越小；而 MBE 低于 0 的幅度越小，在数学上 MBE 越大。因此对图 4(c)的正确解读就是：相对湿度越大，数学上 MBE 也越大，即低估幅度越小，FAO 24 与 PM 的吻合程度越好。这也与 2.1 中 FAO 24 在南方站点表现好、北方站点表现差是一致的。因此图 4(c)说明，在越湿润的气候条件下，FAO 24 与 PM 的吻合程度越好，反之则差。可见，影响 FAO 24 与 PM 吻合程度的关键因子与其他综合法不同。

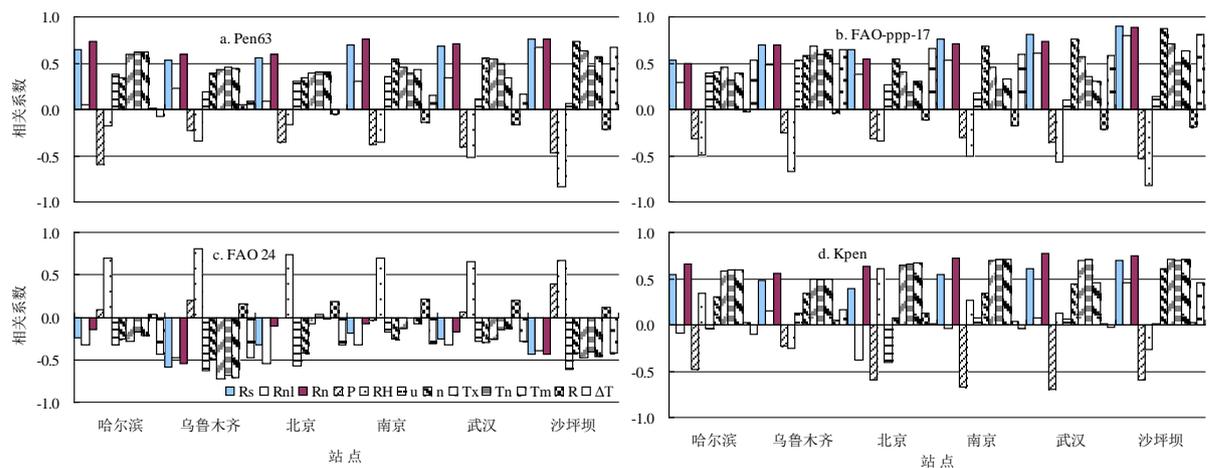


Figure 4. Correlations of difference for ET_0 between PM and combination methods with meteorological variables
图 4. 综合法与 PM 差异与气象变量的相关性

4. 讨论与结论

本文结果与以往研究结果有一定差异。Jensen 等[8]综合所有站点的排序为：Pen63 > FAO-ppp-17 > FAO 24，其标准差(SEE)分别为 0.57、0.91、0.66 mmd^{-1} ，而且这一顺序在干旱、湿润站点都适用。这与本文结果部分一致，即在北方的干旱站点 Pen63 表现最好。但在湿润站点关于 FAO24 的结果与本文不一致。由于涉及的 ET_0 方法及站点较多，Jensen 等[8]使用了月平均日数据，因而忽略了数据在月内的日变化，这可能会影响评价结果。Irmak 等[7]在美国湿润气候下也评价了 Pen63 和 FAO 24，但结论与本文也不一致。其结果是 Pen63 最好，FAO 24 则较差，SEE 分别为 0.14、0.22 mmd^{-1} 。但与本文比较一致的是 Pen63 高估。差异的原因有可能是公式辅助参数的算法不同所致，他们的估算完全按照 FAO 56 方法，而本文部分遵循了 Pen63 原式的算法。

国内专门针对综合法的系统研究很少。龚元石[14]在北京比较了 FAO-ppp-17 与 PM，指出前者高于

PM, 月偏差 10%~25%, 年偏差 16%, 这与本文结果趋势相一致。胡顺军等[23]在新疆的研究表明, FAO-ppp-17 的年均略大于 PM, 绝对偏差 42~128 mm, 相对偏差 3.3%~9.8%。但 1、2、12 月低估 PM, 3~10 月高估。与本文结论趋势一致, 但个别月份有差异。国内虽对 FAO-ppp-17 研究较多, 但很少提供计算细节。龚元石[14]只给出了 R_n 公式, 其他参数如何计算均未提及。杜尧东[15]给出了计算细节, 但其结论与本文不一致, 特别是峰值月份 $PM > FAO-ppp-17$ 与本文结果相反。张文毅[16]也未给出具体过程, 其结果是 4~7 月 $FAO-ppp-17 > PM$, 其他月份小于 PM, 这与杜尧东[15]的结论也不一致。这些不一致的结论, 可能是辅助参数算法不同引起, 也可能是数据处理方式不同引起。深究这些不一致的原因是目前 ET_0 评价研究面临的重要科学问题。

本文结果强调了作物系数法估算需水量范式下 K_c 与 ET_0 匹配使用的重要性。在 FAO 56 PM 推荐之前, FAO-ppp-17 及 Pen63 曾在我国广泛使用。例如我国上世纪 90 年代初期较有影响的作物需水量等值线图研究[24]就基于 FAO-ppp-17。当时由于对 ET_0 评价的重要性认识不足, 未经比较就直接选用了该方法。但根据本文结果, 不论是 Pen63、还是 FAO-ppp-17 在我国农业主产区都存在严重高估问题。而由于目前的 K_c 信息多基于 FAO-ppp-17, 但使用的 ET_0 方法已发生改变, K_c 与 ET_0 不匹配的现实将造成农业用水估算的不确定性。因此在 FAO 56 PM 框架下重新认识我国主要作物的 K_c 对正确认识作物耗水及我国农业用水十分必要。

参考文献 (References)

- [1] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., et al. (1998) Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig and Drain Paper No. 56, Rome.
- [2] Penman, H.L. (1948) Natural Evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc of the Royal Soc, Series A*, **193**, 120-145.
- [3] Monteith, J.L. (1965) Evaporation and the environment. *Symposium of the Society of Exploratory Biology*, **19**, 205-234.
- [4] Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. (1972) On the assessment of surface heat and evaporation using large-scale parameters. *Mon Weather Rev*, **100**, 81-92.
- [5] Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R. (1957) Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, 10, 311.
- [6] Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, **1**, 96-99.
- [7] Irmak, S., Allen, R.G. and Whitty, E.B. (2003) Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. *J. Irrig. Drain. Eng.*, **129**, 360-370.
- [8] Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G. (1990) Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70. ASCE, New York.
- [9] Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1977) Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24, (rev.) FAO, Rome, Italy.
- [10] Frère, M. and Popov, G.F. (1979) Agrometeorological crop monitoring and forecasting. FAO Plant Production and Protection Paper 17. FAO, Rome, Italy.
- [11] Wright, J.L. and Jensen, M.E. (1972) Peak water requirements of crops in Southern Idaho. *J. Irrig. and Drain. Div., ASCE*, **96(IR1)**, 193-201.
- [12] Wright, J.L. (1982) New evapotranspiration crop coefficients. *J. Irrig. and Drain. Div., ASCE*, **108(IR2)**, 57-74.
- [13] Wright, J.L. (1996) Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration. In: Camp, C.R., Sadler, E.J. and Yoder, R.E., Eds., *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, Proc. Int'l. Conf., ASAE, San Antonio, 133-140.
- [14] 龚元石 (1995) Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17 Penman 修正式计算参考作物蒸散量的比较. *北京农业大学学报*, **1**, 68-75.
- [15] 杜尧东, 刘作新, 张运福 (2001) 参考作物蒸散计算方法及其评价. *河南农业大学学报*, **1**, 57-61.
- [16] 张文毅, 党进谦, 赵璐 (2010) Penman-Monteith 公式与 Penman 修正式在计算 ET_0 中的比较研究. *节水灌溉*, **12**,

54-59.

- [17] Howell, T.A., Evett, S.R., Schneider, A.D., Dusek, D.A. and Copeland, K.S. (2000) Irrigated fescue grass ET compared with calculated reference ET. *Proceedings of the 4th National Irrigation Symposium*, St. Joseph, Mich, ASAE, 228-242.
- [18] Yoder, R.E., Odhiambo, L.O. and Wright, W.C. (2005) Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, **21**, 197-202.
- [19] Nandagiri, L. and Koveer, G.M. (2006) Performance evaluation of reference evapotranspiration equation across a range on Indian climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **132**, 238-249.
- [20] Penman, H.L. (1963) *Vegetation and hydrology*. Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of soils, Harpenden, England.
- [21] Liu, X.Y., Xu, Y.L., Zhong, X.L., et al. (2012) Assessing models for parameters of the Ångström-PreScott formula in China. *Applied Energy*, **96**, 327-338.
- [22] Liu, X.Y., Mei, X.R., Li, Y.Z., et al. (2009) Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Ångström-PreScott coefficient: Locally calibrated versus the FAO recommended. *Agricultural Water Management*, **96**, 1137-1145.
- [23] 胡顺军, 潘渝, 康绍忠, 等 (2005) 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. *农业工程学报*, **6**, 30-35.
- [24] 陈玉民, 郭国双 (1993) 中国主要农作物需水量等值线图研究. 中国农业科技出版社, 北京.