

# 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

胡顺军<sup>1,2</sup>, 潘 渝<sup>3</sup>, 康绍忠<sup>2,4</sup>, 宋郁东<sup>1</sup>, 田长彦<sup>1</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 3. 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049; 4. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

**摘 要:** 利用 1989~1996 年阿克苏水平衡试验站的气象资料, 对 Penman-Monteith 公式和 Penman 修正式计算的参考作物潜在腾发量进行了比较。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, 绝对偏差为 42~128 mm, 相对偏差为 3.3~9.8%, 且年际间变化不大。各月的参考作物潜在腾发量变化较大, 绝对偏差可正可负, 1、2、12 月小于 0, 3~10 月大于 0, 相对误差 1、12 月较大, 2、11 月较小, 其它月份变化不大。导致计算偏差的原因在于两种公式采用了不同的辐射项和空气动力项计算公式和参数。两种公式计算的参考作物潜在腾发量具有显著的线性相关性。

**关键词:** Penman-Monteith 公式; Penman 修正式; 参考作物潜在腾发量

**中图分类号:** S152.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1002-6819(2005)06-0030-06

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 CSAE, 2005, 21(6): 30-35. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

参考作物潜在腾发量反映了大气蒸发能力, 其实质反映了气象因素对植物蒸发蒸腾量的影响, 是计算作物需水量和荒漠植被腾发量的一个重要参数。参考作物潜在腾发量是由潜在腾发量的概念演变来的, 潜在腾发量是 Penman (1948) 在 20 世纪 40 年代提出来的<sup>[1]</sup>。Penman (1953) 通过对植物水分蒸腾生理机制的研究, 首次提出了单个叶片气孔蒸腾的计算模式<sup>[2]</sup>, Monteith (1965) 在 Penman 等人工作的基础上, 提出了以能量平衡和水汽扩散理论为基础的 Penman-Monteith 公式<sup>[3]</sup>。Jensen (1954) 等<sup>[4]</sup>首次提出了参考作物潜在腾发量的概念, FAO (1977)<sup>[5]</sup>给参考作物潜在腾发量规定了明确的定义, 即参考作物潜在腾发量 (Reference Crop Evapotranspiration) 系指高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水的绿色草地 (8~15 cm) 的蒸发蒸腾量。Allen (1989) 等<sup>[7]</sup>在 Penman-Monteith 原式的基础上, 假设作物冠层阻力系数与作物高度成反比, 空气动力学阻力系数与风速成反比关系, 得到了在假想条件下的 Penman-Monteith 近似式, 并用该式与其他几个彭曼修正式的计算结果一起与分布在世界各地 11 个蒸渗仪的实测资料进行了比较。结果表明, 用 Penman-Monteith

公式计算的参考作物潜在腾发量与实测值最为接近。Jensen (1990) 等<sup>[8]</sup>用 20 种计算或测定腾发量的方法与蒸渗仪的实测参考作物腾发量作比较后列出了它们排名的顺序, 不论在干旱地区, 还是在湿润地区, Penman-Monteith 公式都是最好的一种计算法。基于这一结论, 1990 年 3 月 FAO 推荐用 Penman-Monteith 公式计算参考作物潜在腾发量<sup>[9]</sup>。1994 年, FAO 又对参考作物潜在腾发量进行了新的定义, 即参考作物潜在腾发量为—假想的参照作物冠层的腾发速率。假设作物高度为 0.12 m, 固定的叶片阻力为 70 s/m, 反射率为 0.23, 非常类似于表面开阔, 高度一致, 生长旺盛, 完全遮盖地面而不缺水的绿色草地的蒸发蒸腾量<sup>[10]</sup>, 根据这一定义可以得到 FAO Penman-Monteith 公式<sup>[11,12]</sup>。龚元石 (1995)<sup>[13]</sup>、刘钰 (1997)<sup>[16]</sup>、史海滨 (1997)<sup>[17]</sup>、杜尧东 (2001) 等<sup>[18]</sup>对 Penman-Monteith (1990) 法与 Penman 修正式 (1979) 进行了系统对比分析。

本文利用阿克苏平衡站 1989 年~1996 年的逐日气象资料, 采用 Penman-Monteith 公式和 Penman 修正式计算了逐日、统计了逐月逐年参考作物潜在腾发量, 对两种方法的计算结果进行比较, 并对导致计算偏差的原因进行深入分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 阿克苏水平衡试验站概况

阿克苏水平衡试验站位于塔里木河三大源流——阿克苏河、叶尔羌河、和田河交汇处附近的冲积平原新型绿洲区内。属暖温带内陆型气候, 地理坐标: 东经 80°51', 北纬 40°37', 海拔高程 1028 m。土壤为沙性壤土, 年平均气温 11.2℃, 年平均降水量 45.7 mm, 无霜期 207

收稿日期: 2004-09-03 修订日期: 2005-03-05

基金项目: 国家自然科学基金 (40471020); 863 计划 (2002AA2Z4201); 国家科技攻关计划 (2002BA901A36); 中国科学院“西部之光”项目

作者简介: 胡顺军 (1968-), 男, 汉族, 陕西勉县人, 副研究员, 博士生, 主要从事干旱区生态水文、节水灌溉等方面的研究。乌鲁木齐中国科学院新疆生态与地理研究所, 830011

d. 1982 年建站, 该站除进行不同蒸发面积和不同水深的水面蒸发对比观测外, 还进行常规气象要素观测, 包括气温、相对湿度、水汽压和风速等。

1.2 参考作物潜在腾发量的计算方法

1) Penman-Monteith 公式<sup>[11-16]</sup>

计算参考作物潜在腾发量的 Penman-Monteith 公式

$$ET_0(PM) = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式(1)第一部分为辐射项, 第二部分为空气动力学项, 即

$$ET_{0rad}(PM) = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

$$ET_{0aero}(PM) = \frac{\gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中  $ET_0(PM)$  —— 参考作物潜在腾发量, mm/d;  $\Delta$  —— 饱和水汽压与温度曲线的斜率, kPa/°C;  $R_n$  —— 参考作物冠层表面净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $G$  —— 土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $\gamma$  —— 干湿表常数, kPa/°C;  $U_2$  —— 2 m 高处的平均风速, m/s;  $e_s$  —— 饱和水汽压, kPa;  $e$  —— 实际水汽压, kPa。

2) Penman 修正公式

1948 年 Penman 在英格兰南部的罗塔姆蒂德(Rothamsted)地区首次提出了无水汽水平输送情况下的参考作物潜在腾发量计算, 其表达式为

$$ET_0(P) = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

该式曾在国际上广泛应用, 后经多次修改, 形成多种形式的彭曼修正公式, 其中 1979 年联合国粮农组织(FAO)推荐的修正公式为<sup>[17,18]</sup>

$$ET_0(P) = \frac{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} R_n + E_a}{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1.0} = \frac{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} R_n}{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1.0} + \frac{E_a}{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1.0} \quad (5)$$

该式考虑了气压和风速修正。

式中前者为辐射项, 后者为空气动力学项。

$$ET_{0rad}(P) = \frac{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} R_n}{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1.0} \quad (6)$$

$$ET_{0aero}(P) = \frac{E_a}{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1.0} \quad (7)$$

式中  $P_0$  —— 海平面平均气压, hPa;  $P$  —— 计算点平均气压, hPa;  $\Delta$  —— 饱和水汽压—温度曲线上的斜率, hPa/°C;  $\gamma$  —— 干湿表常数, mbar/°C;  $E_a$  —— 空气动力学项, mm/d,  $E_a = 0.26(e_s - e_a)(1 + CU_2)$ ;  $e_s$  ——

饱和水汽压, hPa;  $e_a$  —— 实际水汽压, hPa;  $U_2$  —— 2 m 高处风速, 若用气象站常规观测高度的风速则需乘以 0.75 的修正系数, m/s;  $C$  —— 与最高气温和最低气温有关的风速修正系数。

1.3  $ET_0(PM)$  与  $ET_0(P)$  方法比较

为了比较极端干旱的塔里木盆地用 Penman-Monteith 公式和 Penman 修正式计算的参考作物潜在腾发量, 用以下符号区分两种方法的计算结果

$ET_0(PM)$ 、 $ET_{0rad}(PM)$ 、 $ET_{0aero}(PM)$  —— 用 Penman-Monteith 公式计算的参考作物潜在腾发量、辐射项部分、空气动力学项部分;

$ET_0(P)$ 、 $ET_{0rad}(P)$ 、 $ET_{0aero}(P)$  —— 用 FAO 修正的 Penman 公式计算的参考作物潜在腾发量、辐射项部分、空气动力学项部分。

绝对偏差

$$\Delta ET_0 = ET_0(PM) - ET_0(P) \text{ (总偏差)} \quad (8)$$

由于辐射项处理不同造成的参考作物潜在腾发量的偏差

$$\Delta ET_{0rad} = ET_{0rad}(PM) - ET_{0rad}(P) \quad (9)$$

由于空气动力学项处理不同造成的参考作物潜在蒸散量的偏差

$$\Delta ET_{0aero} = ET_{0aero}(PM) - ET_{0aero}(P) \quad (10)$$

$$\Delta ET_{0rad} / \Delta ET_0 + \Delta ET_{0aero} / \Delta ET_0 = 1 \quad (11)$$

或

$$R_{0rad} + R_{0aero} = 1 \quad (12)$$

式中  $R_{0rad} = \Delta ET_{0rad} / \Delta ET_0$ , 由辐射项处理不同造成的偏差占总偏差的百分数;  $R_{0aero} = \Delta ET_{0aero} / \Delta ET_0$ , 由空气动力学项处理不同造成的偏差占总偏差的百分数。

相对偏差用  $R$  表示

$$R = \frac{\Delta ET_0}{ET_0(PM)} = \frac{\Delta ET_{0rad}}{ET_0(PM)} + \frac{\Delta ET_{0aero}}{ET_0(PM)} = R_{0rad} + R_{0aero} \quad (13)$$

2 结果与分析

2.1 参照作物潜在腾发量年变化比较

图 1 是两种方法计算的参考作物潜在腾发量历年变化情况。从图 1 可以看出 Penman 公式计算的  $ET_0$  值大于 Penman-Monteith 公式计算的  $ET_0$  值。由 Penman-Monteith 公式计算的 1990~1996 年参考作物潜在腾发量为 1145~1384 mm, 平均 1251 mm。由修正的 Penman 公式计算的 1990~1996 年参考作物潜在腾发量为 1229~1512 mm, 平均 1341 mm。参考作物潜在腾发量年值之间的绝对偏差  $\Delta ET_0$  为 42~128 mm, 相对偏差在年际间的变化不大, 其值为 3.3%~9.8%。经过  $t$  检验,  $|t| > t_{0.05} = 2.447$ , 说明两种方法的计算结果在 0.05 置信水平上具有显著差异。因此, 在极端干旱的塔里木盆地不能直接用 Penman 公式计算的  $ET_0$  年值结果代替 Penman-Monteith 公式计算的  $ET_0$  年值结果。

表 1 是两种方法计算的参考作物潜在腾发量年值系列的最大值、最小值、极差、均值、标准差及变异系数, 表 1 显示, 两种方法计算的参考作物潜在腾发量的标准差和变异系数相差不大, 且变异系数较小, 说明年参考



作物潜在腾发量计算结果较为稳定。

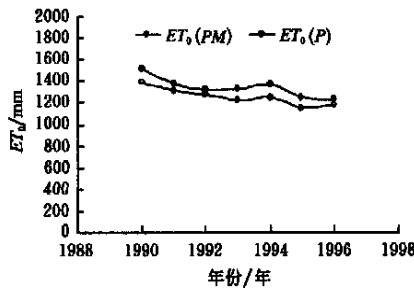


图1 参考作物潜在腾发量历年变化比较

Fig 1 Comparison of annual variation of reference evapotranspiration

表1 Penman 和 Penman-Monteith 公式计算的 ET0 年值系列的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of the yearly series of ET0 calculated by the Penman and Penman-Monteith method

计算方法	最大值 /mm	最小值 /mm	均值 /mm	极差 /mm	标准差 /mm	变异系数
Penman	1512	1252	1341	260	93	0.069
Penman-Monteith	1384	1145	1251	238	82	0.066

### 2.2 ET0(PM) 及 ET0(P) 的逐日累积曲线变化规律比较

图2是1989~1996年平均的ET0(PM)及ET0(P)的逐日累积曲线比较图。从图2可见,两者之间的差别不大,日序85d以前ET0(P)的逐日累积值大于ET0(PM)的逐日累积值,85d以后ET0(P)的逐日累积值小于ET0(PM)的逐日累积值。ET0(PM)年值小于ET0(P)年值,多年平均值的偏差不过100mm。

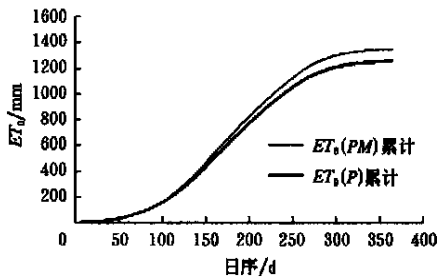


图2 ET0(PM) 及 ET0(P) 的日累积曲线

Fig 2 Cumulative reference evaporation calculated by the Penman and Penman-Monteith method

### 2.3 ET0(PM) 及 ET0(P) 月均值变化规律比较

图3表示两种方法计算的参考作物潜在腾发量及其组成(辐射项和空气动力项)多年平均逐月均值变化。由图3可知:ET0在年内均呈单峰型,除1、2月和12月外,其它月份ET0(P)大于ET0(PM);除1、11、12月外,其它月份ET0rad(P)大于ET0rad(PM);除1、2、12月份外,ET0aero(P)大于ET0aero(PM)。

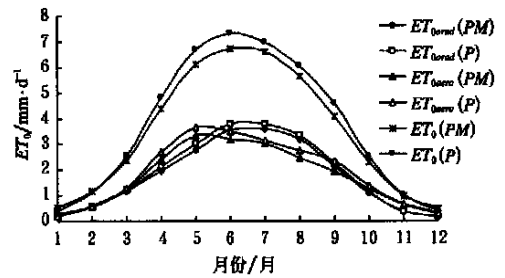


图3 参考作物潜在腾发强度逐月均值变化

Fig 3 Changes of monthly average reference ET0

表2是两种方法计算的参考作物潜在腾发强度月均值的某些统计特征值,参考作物潜在腾发强度各月变化较大,极差达6.23~6.90,标准差达1.90~2.09,变异系数达0.552~0.571。图4为Penman-Monteith公式与Penman公式计算的1990~1996年参考作物潜在腾发强度逐月的变异系数,从整体变化趋势看,变异系数都呈现从1月到8月逐渐减小,从8月至12月逐渐增大的变化趋势。2、11、12月Penman-Monteith公式计算结果的变异系数大于与Penman公式计算结果的变异系数,1、3~9月Penman-Monteith公式计算结果的变异系数小于Penman公式计算结果的变异系数。2、10、11、12月变异系数的差别较大,其它月份变异系数的差别较小。变异系数的差别说明在不同月份两种方法对各气象要素的敏感性不同。对两种方法计算的参考作物潜在腾发强度的逐月t检验结果(表3)表明,两种方法在2、10、11月份的计算结果没有显著差异,而其它月份的差异都达到极显著水平。这说明在极端干旱的塔里木盆地,2、10、11月3个月Penman-Monteith计算的结果与Penman公式计算的结果是等同的,可以互相代替;其它月份不能相互代替,必须进行系数订正,否则将会产生较大误差。

表2 Penman-Monteith 与 Penman 公式计算的参考作物潜在腾发强度月均值的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of the multi-year monthly average ET0 calculated by the Penman and Penman-Monteith method

计算方法	最大值	最小值	均值	极差	标准差	变异系数
Penman	7.31	0.41	3.69	6.90	2.09	0.571
Penman-Monteith	6.71	0.48	3.44	6.23	1.90	0.552

表3 用 Penman-Monteith 与 Penman 公式计算的参考作物潜在腾发强度逐月的 t 检验结果

Table 3 T-test of the multi-year monthly value of ET0 calculated by Penman and Penman-Monteith method

月份	1	2	3	4	5	6
t 值	5.81**	0.61	-3.97**	-5.79**	-8.71**	-7.27**
月份	7	8	9	10	11	12
t 值	-13.79**	-8.89**	-7.00**	-2.20	-0.64	3.56**

注: t0.05 = 2.447; \*\* 差异极显著。

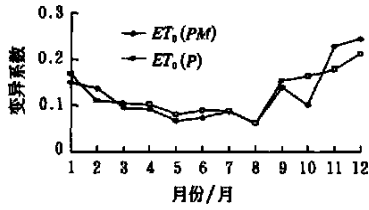


图 4 用 Penman-Monteith 与 Penman 公式计算的参考作物潜在腾发强度月变异系数

Fig 4 Variability of  $ET_0$  calculated by the Penman-Monteith and Penman method

2.4 绝对偏差  $\Delta ET_0$  及相对偏差  $R$  的逐月变化规律

用 Penman-Monteith 与 Penman 公式计算的参考作物潜在腾发强度月平均值之间的绝对偏差  $\Delta ET_0 = ET_0(PM) - ET_0(P)$  可正可负。负最大值出现在 6 月份, 相差约 0.60 mm/d, 负最小值出现在 11 月份, 相差约 0.02 mm/d, 正的最大值出现在 1 月份。2 月份和 11 月份的绝对偏差  $\Delta ET_0$  较小。12 月、1 月、2 月,  $ET_0(PM)$  大于  $ET_0(P)$ , 即  $\Delta ET_0 > 0$ , 3 ~ 11 月,  $ET_0(P)$  小于  $ET_0(PM)$ , 即  $\Delta ET_0 < 0$ 。由图 5 可知,  $\Delta ET_{0rad}$  随时间的变化曲线表现为单峰型;  $\Delta ET_{0aero}$ 、 $\Delta ET_0$  随时间的变化趋势非常一致(相似), 呈双峰型, 第一峰出现在 6 月, 第二峰出现在 9 月, 谷值出现在 7 月。用 Penman-Monteith 与 Penman 公式计算的参考作物潜在腾发强度月平均值之间的相对偏差如图 6 所示。

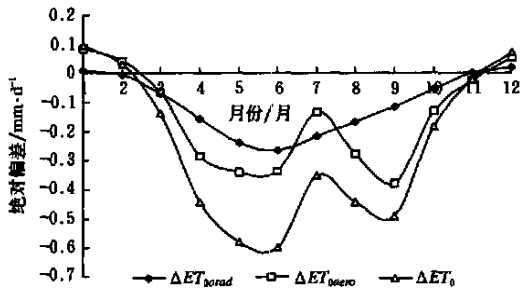


图 5 用 Penman-Monteith 与 Penman 公式计算的参考作物潜在腾发强度月均值的绝对偏差

Fig 5 Monthly absolute deviations between Penman-Monteith and Penman method

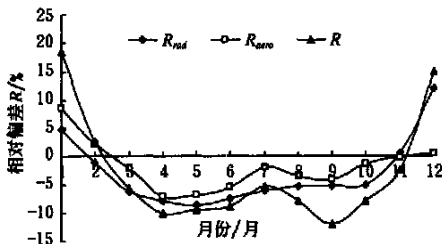


图 6 用 Penman-Monteith 与 Penman 公式计算的参考作物潜在腾发强度月均值之间的相对偏差

Fig 6 Monthly relative deviations between Penman-Monteith and Penman method

在 2 月和 11 月较小, 1 月和 12 月较大, 其它各月变化相对平稳。从 2 月至 11 月小于 12.07%, 1 月最大为 18.54%, 12 月次之为 14.92%, 最小值出现在 11 月份为 2.33%; 辐射项的相对偏差  $R_{rad}$  全年不超过 12%, 最大值出现在 12 月, 为 11.87%, 最小值出现在 11 月, 为 0.61%, 空气动力学项的相对偏差  $R_{aero}$  全年不超过 9%, 其最大值出现在 1 月, 最小值出现在 11 月。

2.5 两种方法计算结果的相关分析

为了分析两种方法计算的参考作物潜在腾发量的关系, 并实现两种计算结果的转化, 拟建立通过原点的直线回归方程

$$ET_0(PM) = aET_0(P) \quad (14)$$

根据 1989~1996 年阿克苏水平衡站的气象资料, 采用上述两种方法的计算结果, 建立每月的回归方程如表 4 所示, 二者具有良好的相关关系。

表 4 用 Penman-Monteith 公式与 Penman 公式计算的参考作物潜在腾发量之间的回归方程

Table 4 Regression equations of  $ET_0$  calculated by Penman-Monteith and Penman method

月份	回归方程	样本数	相关系数	显著性
1	$ET_0(PM) = 1.0622ET_0(P)$	215	0.6758	极显著
2	$ET_0(PM) = 0.9805ET_0(P)$	191	0.9284	极显著
3	$ET_0(PM) = 0.9491ET_0(P)$	218	0.9486	极显著
4	$ET_0(PM) = 0.9393ET_0(P)$	207	0.8936	极显著
5	$ET_0(PM) = 0.9241ET_0(P)$	249	0.7879	极显著
6	$ET_0(PM) = 0.9191ET_0(P)$	241	0.7725	极显著
7	$ET_0(PM) = 0.9558ET_0(P)$	249	0.8492	极显著
8	$ET_0(PM) = 0.9316ET_0(P)$	249	0.8860	极显著
9	$ET_0(PM) = 0.9032ET_0(P)$	241	0.9185	极显著
10	$ET_0(PM) = 0.9178ET_0(P)$	249	0.9155	极显著
11	$ET_0(PM) = 0.9739ET_0(P)$	239	0.9239	极显著
12	$ET_0(PM) = 1.1127ET_0(P)$	247	0.7431	极显著
全年	$ET_0(PM) = 0.9301ET_0(P)$	2803	0.9743	极显著

2.6 参考作物潜在腾发量  $ET_0(PM)$  和  $ET_0(P)$  之间差异的成因分析

12、1、2 月利用 Penman-Monteith 公式计算的  $ET_0$  值大于利用 Penman 公式计算的  $ET_0$  值。Penman 修正式计算的年  $ET_0$  值大于 Penman-Monteith 公式计算的年  $ET_0$  值。计算结果的偏差显然是由于 2 个公式中辐射项和空气动力学项选用的计算公式及参数不同造成的。在一年中的不同时间辐射项及空气动力学项对参考作物潜在腾发量的贡献是不同的。由(13)式可知参考作物潜在腾发量的偏差可分解为辐射项及空气动力学项引起的偏差。图 7 说明辐射项及空气动力学项引起的偏差占总偏差的百分数逐月变化的规律。由图 7 可知  $R_{orad}$  只有在 3 月份与 7 月份大于  $R_{oaero}$ , 其它月份都是  $R_{orad}$  小于  $R_{oaero}$ , 而且秋冬季表现得特别明显, 说明两种计算公式中由于空气动力学项的不同处理是引起秋冬季计算结果差异的主要原因。4 ~ 6 月及 8 月份  $R_{orad}$  略低于  $R_{oaero}$ , 说明该时期由于辐射项的不同处理所引起计算结果的差异的作用有所提高,  $R_{orad}$  变化在 35.69% ~ 44.22%,  $R_{oaero}$  变化在 55.78% ~ 64.31%。对参考作物

潜在腾发量的年值来说, 1991 年、1992 年由于辐射项的不同引起计算结果的差异要比由于空气动力学项的不同引起计算结果的差异要大, 1993~ 1995 年由于空气动力学项的不同引起计算结果的差异要比由于辐射项的不同引起计算结果的差异要大, 1990 和 1996 年两者的差别不明显(如图 8 所示)。

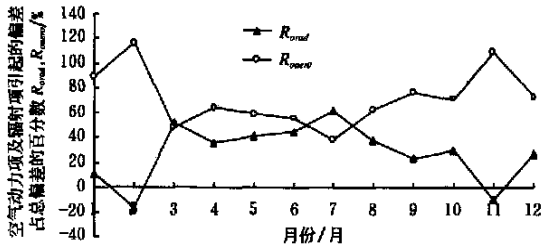


图 7 辐射项及空气动力项引起的偏差占总偏差的百分数逐月变化规律

Fig 7 Monthly percentage  $R_{rad}$  and  $R_{aero}$  caused by the radiation term and aerodynamic term respectively

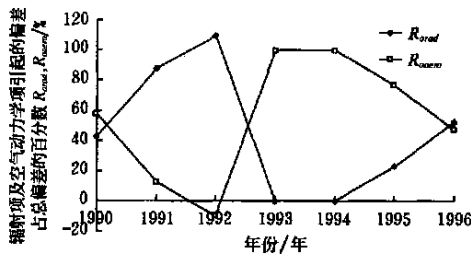


图 8 辐射项及空气动力项引起的偏差占总偏差的百分数的年际变化规律

Fig 8 Yearly percentage  $R_{rad}$  and  $R_{aero}$  caused by the radiation term and aerodynamic term respectively

#### 4 结论与讨论

1) 用 Penman-Monteith 公式与 Penman 修正式计算的塔里木盆地参考作物潜在腾发量  $ET_0$  逐日累积值间的差异不明显, 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。

2) 用 Penman-Monteith 公式与 Penman 修正式计算的参考作物潜在腾发量之间的绝对误差 1、2、12 月小于 0; 3~ 11 月大于 0; 2 月份和 11 月较小, 相对误差 2 月和 11 月较小, 1 月和 12 月较大, 其它月份变化相对平稳, 两种方法计算的参考作物潜在腾发量年总值的绝对偏差为 42~ 128 mm, 相对偏差为 3.3%~ 9.8%, 且年际间变化不大。

3) 两种公式计算结果发生偏差的原因是由于辐射项及空气动力学项采用不同的计算公式及参数造成的, 8 月至次年 2 月份空气动力学项是导致两种计算结果差异的主要原因。3、7 月辐射项引起的偏差略大于空气动力学项引起的偏差, 4~ 6 月虽然空气动力学引起偏差大于辐射项引起的偏差, 但辐射项引起偏差的作用在逐

渐提高。对参考作物潜在腾发量计算结果的年值来说, 两种计算结果的差异中空气动力学项和辐射项的相对重要性逐年变化较大。关于参考作物潜在腾发量的计算涉及作物、计算方法和气象资料等方面。FAO 对参考作物潜在腾发量的新定义为参考作物潜在腾发量为—假想的参照作物冠层的腾发速率。假设作物高度为 0.12 m, 固定的叶片阻力为 70 s/m, 反射率为 0.23, 非常类似于表面开阔, 高度一致, 生长旺盛, 完全遮盖地面而不缺水的绿色草地的蒸发蒸腾量。这使得 Penman-Monteith 公式在一定程度上达到了统一和标准化, 它有一套计算方法, 而且对于有些参数推荐了许多算法或取值。因此, 它并不是一个完全统一、标准化的不需要地区率定, 也不需要改变任何参数的计算  $ET_0$  的方法。任何方法都应进行地区率定。而在缺乏某些资料时, 才可以使用推荐值。Penman-Monteith 法是一种需要进行地区率定的适用于中国和世界各国的计算  $ET_0$  的方法, 其它方法只有在地区率定的基础上跟 Penman-Monteith 公式计算值比较后, 才能判断其是否适用于某一地区。

4) 通过建立 Penman-Monteith 公式计算的参考作物潜在腾发量  $ET_0(PM)$  与其它方法计算的参考作物潜在腾发量  $ET_0$  之间的关系, 经这种关系转化后某方法亦可以适用于某一地区。塔里木盆地  $ET_0(PM)$  与  $ET_0$  之间具有有良好的线性关系。

#### [参 考 文 献]

- [1] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proc R Soc London Ser, 1948, A 193: 120- 146
- [2] Penman H L. The physical basis of irrigation control[R]. Rep 13th Int Hort Cong, 1953, 2: 913- 915
- [3] Monteith J L. Evaporation and environment [J]. Symp Soc Exp Biol, 1965, 19: 205- 234
- [4] Jensen M E, Wright J L, Pratt P J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data [J]. Trans of the ASAE, 1971, 14: 954- 959
- [5] Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements [M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd edition. Rome, 1977.
- [6] Frere M, Popov G F. Agrometeorological crop monitoring and forecasting [M]. FAO Plant Production and Protection Paper 17, Rome, 1979.
- [7] Allen R G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration [J]. Agronomy Journal, 1989, 81: 650- 662
- [8] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements [J]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990, 70: 332
- [9] Smith M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Land and Water Development Division [M]. FAO Rome, 1991: 54
- [10] Allen R G, Smith M, Pereira L S. An update for the

- definition of reference evapotranspiration [J]. *ICD Bulletin*, 1994, 43(2): 1- 34
- [11] Allen R G, Smith M, Pereira L S, et al An update for the calculation of reference evapotranspiration[J]. *ICD Bulletin*, 1994, 43(2): 64- 92
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements[M]. *Irrigation and Drainage Paper*, FAO, Rome, 1998: 300
- [13] 龚元石 Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17 Penman 修正式计算方法参考作物潜在蒸散量的比较[J]. *北京农业大学学报*, 1995, 21(1): 68- 75
- [14] 刘 钰, L. S. Perire, J. L. Teixeira 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. *水利学报*, 1997, (6): 27- 33
- [15] 史海滨, 何京丽, 郭克贞, 等 参考作物潜在腾发量计算方法及其适用性评价[J]. *灌溉排水*, 1997, 16(4): 50- 54
- [16] 杜尧东, 刘作新, 张运福 参考作物蒸散计算方法及其评价[J]. *河南农业大学学报*, 2001, 35(1): 57- 61
- [17] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章 土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 122- 129
- [18] 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: 45- 65

## Comparison of the reference crop evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith and Penman methods in Tarim River Basin

Hu Shunjun<sup>1,2</sup>, Pan Yu<sup>3</sup>, Kang Shaozhong<sup>2,4</sup>, Song Yudong<sup>1</sup>, Tian Changyan<sup>1</sup>

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;*

2. *Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Yangling 712100, China;*

3. *Xinjiang Institute of Hydraulic and Hydro-power Research, Urumqi 830049, China;*

4. *Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)*

**Abstract** Based on the daily meteorological data in Aksu water balance experimental station in Tarim River Basin from 1989 to 1996, the reference evapotranspirations ( $ET_0$ ) calculated by the Penman-Monteith and Penman methods were compared. The results showed that the annual  $ET_0$  calculated by Penman method was a little higher than that obtained by Penman-Monteith method. The absolute deviation of yearly  $ET_0$  between the two methods was 42~128 mm, the yearly relative deviation was 3.3%~9.8%. The difference of monthly  $ET_0$  was smaller. The absolute deviation of monthly  $ET_0$  between two methods was above zero in January, February and December, and was below zero from March to November. The relative deviation of monthly  $ET_0$  was bigger in January and December, was smaller in February and November, the variation of the relative deviation of monthly  $ET_0$  was small in other months. The main cause of the deviation of  $ET_0$  was that different equations and parameters were used to calculate the radiation item and aerodynamic term in the equations. The correlation between  $ET_0$  calculated by two methods had linear relationship.

**Key words:** Penman-Monteith equation; Modified Penman equation; Reference Evapotranspiration