

用 Hargreaves 法与 Penman-Monteith 法计算 ET_0 ——以太湖流域的应用为例

刘宏伟, 余钟波

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 :为了在太湖流域找到一种适合资料缺乏地区的蒸散发计算方法,利用太湖以西宜兴市梅林试验区的气象监测资料,以 PM(Penman-Monteith)公式为标准,评价 Hargreaves 方法计算潜在蒸散发量(ET_0 ,即参考蒸散发量)的效果。结果表明 :在太湖流域应用 Hargreaves 方法计算的 ET_0 与 PM 方法的计算结果吻合较好。Hargreaves 法在日、旬、月尺度上结果与 PM 法结果均保持较好的变化趋势及峰值的一致性,误差随计算时间段的延长而减小。在阴雨天较多的夏季采用 Hargreaves 方法计算 ET_0 结果会明显偏高。两种方法具有很好的相关性,可以此为依据建立修正方程。经过线性回归方程修正的 Hargreaves 法计算结果平均相对误差明显下降,并且以日 ET_0 结果改进最多。

关键词 :潜在蒸散发量 ;参考蒸散发量 ;Penman-Monteith 法 ;Hargreaves 法 ;太湖流域

中图分类号 :P426.2+2 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2010)01-0006-03

Application of Hargreaves and Penman-Monteith Equation to estimating ET_0 : A case study in Taihu Basin

LIU Hong-wei , YU Zhong-bo

(State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : In order to find a suitable method for estimating evapotranspiration for data-deficient areas in Taihu Basin , the effect of the Hargreaves equation on estimating ET_0 (potential evapotranspiration or reference evapotranspiration) was assessed using the Penman-Monteith (PM) equation , recommended by the FAO as a standard method , with field measurement data from Meilin watershed near Yixing on the west side of Taihu Lake. The results showed that the two methods agree with each other. The Hargreaves results showed trends and peak values similar to those of the PM in the daily , ten-day , and monthly periods. The errors decreased when the estimation period increased. The Hargreaves results overestimated the ET_0 when there were a lot of rainy days in the summer. A good correlation was found between the two methods , and a modified equation was developed. The average relative error of the results estimated with the Hargreaves equation modified using the linear regression equation dropped significantly , and the daily ET_0 correlation improved more than that of other periods.

Key words : potential evapotranspiration ; reference evapotranspiration ; Penman-Monteith method ; Hargreaves method ; Taihu Basin

蒸散发是水文循环中必不可少的组成部分^[1-2],
潜在蒸散发量(ET_0 ,即参考蒸散发量)是计算实际

蒸散发量的关键参数^[1,3-4],联合国粮农组织(FAO)
推荐的 ET_0 标准计算方法是 PM(Penman-Monteith)

基金项目 :国家自然科学基金(50239030 , 50679018) ; 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0717)

作者简介 : 刘宏伟(1982—) ,男,辽宁朝阳人,博士研究生,研究方向为环境水文和分布式水文模拟。E-mail : liu2000.cn@gmail.com

通讯作者 : 余钟波,教授。E-mail : zhongbo.yu@unlv.edu

公式^[5]。然而,PM法对资料要求高,在广大的资料缺乏地区无法使用,在太湖流域也是如此。 ET_0 计算在水文过程的模拟与预报,水资源管理,节水灌溉研究,以及规划与环境评价等领域都是必不可少的^[2]。经济发展迅猛的太湖流域对这些工作的要求也日益加强。因此,找到一种资料要求低而精度较好的 ET_0 计算方法十分必要。

世界各地多年研究结果表明,PM方法在干旱和湿润地区都有着较好的精度^[2,5]。然而,使用PM公式需要使用许多气象资料,包括最高气温、最低气温、相对湿度、风速、日照时数等,在很多地区难以完整得到。Hargreaves等^[6]在1985年建立的Hargreaves公式,只需要日最高、日最低气温和太阳辐射就可以进行较高精度的计算。刘钰等^[7]比较了修正Penman法和PM法在国内应用结果,肯定了PM法的使用效果,并推荐其作为其他方法修正的标准。Wu等^[8]利用夏威夷3a气象资料比较6种不同方法,认为Hargreaves法有较好实用效果。刘晓英等^[9]讨论了几种不同的基于温度的 ET_0 计算方法在华北地区的应用效果,认为在这些方法中Hargreaves法最优。王新华等^[2]在西北干旱地区比较Hargreaves法和PM方法计算结果,并讨论了Hargreaves方法的适用性。在北方地区的成功应用推动了该方法在南方地区的试用研究,彭世彰等^[3]以PM法为标准比较了3种不同类型方法在江西的应用效果,认为Priestly Taylor(1972)方法最优,Hargreaves(1985)方法差异较大。然而Priestly Taylor法对资料的要求仍然较高,并且该比较结果是建立在约90d的很短观测基础上的,与Wu^[8]在湿润地区应用的结论不相一致,有必要进行进一步的观测和研究。

Hargreaves法以其资料要求低和精度较高的优点,在世界各地得到广泛应用。许多研究人员在此基础上进行了改进工作^[6],而国内这方面的研究工作还非常有限。对于我国广大的监测资料不充足的地区来说,对Hargreaves进行适用性研究有着非常重要的理论和实践价值。笔者利用宜兴市境内梅林试验区逐小时气象监测资料,以PM法为标准探讨资料要求更低的Hargreaves方法在太湖流域湿润气候区的适用前景。

1 试验区概况与分析方法

1.1 试验区概况

试验区梅林实验站地处宜兴市东南,坐标(31°20'N,119°51'E),位于太湖以西约9km。多年平均降雨量约1150mm,多年平均蒸发量约为1224mm。

降雨多集中在6~9月份,汛期雨量占全年降雨总量的45%以上。该地区处于北亚热带季风气候区,受季风环流控制,雨热同季,光照充足。试验区内年最高气温为39.6℃,年最低气温为-13.1℃,年平均气温15.5℃,全年无霜期239d。太阳辐射、温度、湿度、风速、风向等气象资料,利用WS-STD1型自动气象站逐小时自动刻录。降雨量利用翻斗式雨量器和SL3-1型雨量计连续记录,精度0.5mm。

1.2 计算方法

a. PM法。PM法被认为是目前计算 ET_0 精度最可靠的方法,经过FAO的修正和规范,PM法已经成为应用最广泛的方法之一,其基本公式如下:

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

式中: ET_{PM} 为采用PM公式计算的潜在蒸散发量,mm/d; R_n 为地面净辐射, $MJ/(m^2 \cdot d)$; G 为土壤热通量, $MJ/(m^2 \cdot d)$; e_s 、 e_a 分别为饱和水气压、实际水气压,kPa; Δ 为饱和水气压~气温关系斜率, $kPa/^\circ C$; γ 为干湿计常数, $kPa/^\circ C$; U_2 为2m高处风速,m/s; t 为平均气温, $^\circ C$ 。

以上各参数的详细计算参照文献[5,10],以下的Hargreaves方法参数计算同此参照。

b. Hargreaves法。目前最常用的Hargreaves方法是1985Hargreaves公式:

$$ET_{harg} = 0.0023R_a(t + 17.8)(t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (2)$$

式中: ET_{harg} 为采用Hargreaves法计算的潜在蒸散发量,mm/d; t_{max} 、 t_{min} 分别为最高、最低温度, $^\circ C$; R_a 为与外空辐射等价的水量,mm/d^[8,10]。

2 结果与讨论

2.1 不同时间尺度下PM法和Hargreaves法计算结果

选取试验区2007年6月到2008年5月末逐小时监测数据(2007年12月末~2008年2月末由于仪器故障缺失2个月),分别计算日平均、旬平均和年平均,然后将其分别代入PM公式和Hargreaves公式计算 ET_0 ,其中各参数使用了Allen^[5]和李远华^[10]推荐的计算方法。得到的日、旬和月 ET_0 结果如图1~3所示。

总体来看,两种方法的计算值,不论是日、旬,还是月,结果趋势均相同,数值接近。年内变化趋势明显, ET_0 夏季高冬季低并呈波浪形逐渐变化。8月份两种方法计算结果同时达到峰值,1月份同时达到低谷,峰谷符合较好。由于夏季日照时间长,太阳

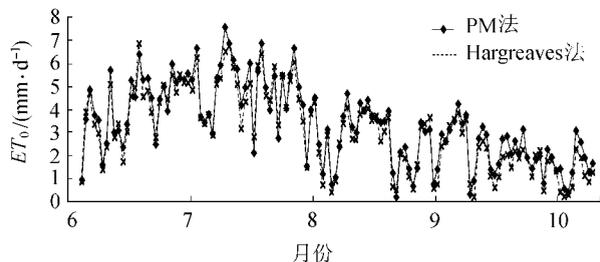


图1 PM法和Hargreaves法日 ET_0 计算结果(2007年)

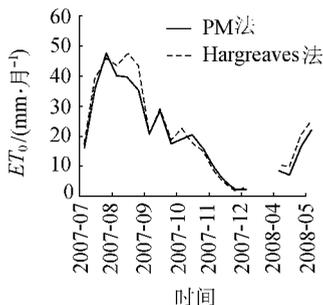


图2 PM法和Hargreaves法旬 ET_0 计算结果

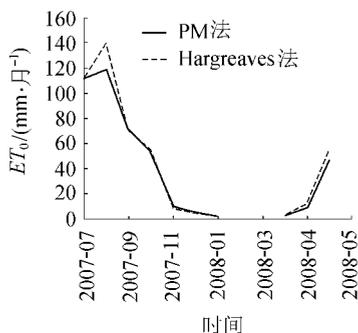


图3 PM法和Hargreaves法月 ET_0 计算结果

高度角较大,气温也较高,因此这样的趋势规律与太阳辐射量及温度变化趋势相符合。

对于日 ET_0 计算值(图1),在任何时间Hargreaves法与PM法相比都互有大小,没有统一的高低规律。从旬和月的 ET_0 来看(图2,3),显然夏春季Hargreaves法比PM计算值略大,而从10月到次年1月之间则十分接近。这是因为在雨水较多的夏季降雨对空气湿度影响很大,PM法中当风速、温度、湿度变化不大时(风速仅在台风登陆时变化较大,天数较少)增加湿度会导致空气动力学项减小和辐射项增大,辐射量的增大速度远远小于空气动力学项减小的幅度,因此总的蒸发量会减小。而Hargreaves方法仅考虑温度和太阳辐射的影响而没有考虑降雨条件下的这种变化,所以在不做修正的情况下,该时段使用Hargreaves法非常容易出现估值偏大的情况。

2.2 相关性、误差以及差异显著性分析

图4为两种方法计算的日蒸散发 ET_0 的比较图。从图4中可见两种方法计算结果相关性很好,

两个结果序列相关系数为0.973(见表1)。日蒸散发的散点图线性拟合方程斜率为0.989,略小于1,截距-0.2133略小于0,Hargreaves方法计算结果较PM法日 ET_0 计算结果略小。对于旬和月计算结果,Hargreaves公式与PM公式相关性的表现更好一些,相关系数分别为0.983和0.994。可见,Hargreaves在较长时间尺度上的计算值更加可靠。

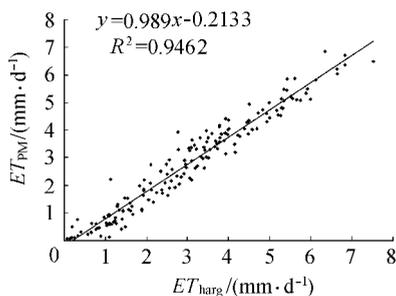


图4 PM法和Hargreaves法日 ET_0 对比及其相关性

表1 Hargreaves法与PM法计算结果误差、显著性分析和相关系数

| 项目 | 均值/mm | 平均相对误差/% | 标准偏差 | F检验($\alpha = 0.05$) | | T检验($\alpha = 0.05$) | | 相关系数 |
|-----|-------|----------|------|------------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| | | | | 计算值 | 临界值 | 计算值 | 临界值 | |
| 日结果 | 0.25 | 11.8 | 0.47 | 0.967 | 0.735/1.361 | 1.293 | 1.967 | 0.973 |
| 旬结果 | 1.49 | 7.2 | 3.02 | 0.839 | 0.396/2.525 | -0.332 | 2.024 | 0.983 |
| 月结果 | 2.98 | 6.0 | 7.02 | 0.841 | 0.248/4.026 | -0.141 | 2.101 | 0.994 |

相对误差分析结果也表明,日结果的平均相对误差在11.8%,旬相对误差7.2%,月相对误差6.0%,与相关系数的变化趋势相一致,反映了在较长时段上计算精度较高。6.0%~11.8%的相对误差处于较大的水平,因此在不做修正的情况下,Hargreaves方法的计算值仍有着比较大的误差。三个时间尺度计算结果的标准偏差随时间段增长而增大,数值与时间段上的蒸发量相比均处于较小的水平。利用F检验和T检验来检查Hargreaves法与PM法计算结果的差异显著性,结果如表1中所示。在三种时间尺度上均通过了F检验和T检验,说明两种方法的结果序列的方差和均值差异不显著。

2.3 计算公式的修正

从上面的分析可见,Hargreaves方法相对PM法来说计算的相对误差仍然较大,在其他相同方面的研究中也经常出现差异显著的情况^[2-3,9],因此有必要利用能取得的资料对Hargreaves公式进行修正,以便充分利用可获得的气象数据来提高其在一定地区适用的计算精度和可靠性。

Hargreaves方程采用了经验系数0.0023,为了改进其地区适应性,可以对系数进行适当调整。鉴于PM法与Hargreaves法两种方法高度的线性相关性,采用2007年6~12月的监测数据,(下转第20页)

[2] GREGER M. Metal availability and bioconcentration in plants [C]/PRASAD M N V ,HAGEMeyer J. Heavy metal stress in plants-from molecules to ecosystems. Berlin :Springer ,1999 : 1-27.

[3] JAYNES M L ,CARPENTER S R. Effects of vascular and nonvascular macrophytes on sediment redox and solute dynamics[J]. Ecology ,1986 67 875-882.

[4] BRIX H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants : the root-zone method [J]. Water Science and Technology ,1987 ,19 :107-118.

[5] LIU J G ,DONG Y ,XU H ,et al. Accumulation of Cd ,Pb and Zn by 19 wetland plant species in constructed wetland[J]. Journal

[6] DEMIREZEN D ,AKSOY A. Accumulation of heavy metals in *Typha angustifolia* and *Potamogeton pectinatus* living in Sultan Marsh (Kayseri ,Turkey) [J]. Chemosphere ,2004 ,56 :685-696.

[7] 李光辉 ,杨霞 ,徐加宽 ,等.不同湿地植物的根系酸化作用与重金属吸收 [J]. 生态环境学报 ,2009 ,18(1) :97-100.

[8] LIU J G ,WANG D K ,XU J K ,et al. Variations among rice cultivars on root oxidation and Cd uptake[J]. Journal of Environmental Sciences 2006 ,18 :120-124.

(收稿日期 2008-11-20 编辑 高渭文)

(上接第 8 页) 通过建立 $ET_{PM} \sim ET_{harg}$ 的回归方程^[2,9,11]找到经验系数的修正倍数的手段来进行修正。利用日、旬和月三种不同时间尺度下两种方法计算得到的 ET_0 数据 ,分别以 Hargreaves 方法的 ET_0 计算结果为自变量建立回归方程。修正系数和修正公式如表 2 所示 ,其中 ET_{harg} 为直接利用 Hargreaves 公式计算得到的 ET_0 、 y 为修正后的 ET_0 结果。

表 2 Hargreaves 法与 PM 法的线性回归公式及修正后的验证误差

| 项目 | 修正公式 | 平均相对误差/% | 相关系数 |
|-----|-----------------------|----------|-------|
| 日结果 | $y = 0.988ET_{harg}$ | 4.15 | 0.973 |
| 旬结果 | $y = 0.9016ET_{harg}$ | 4.04 | 0.983 |
| 月结果 | $y = 0.9122ET_{harg}$ | 5.26 | 0.994 |

利用 2008 年 1 ~ 5 月的监测数据进行验证 ,修正公式计算结果的相对误差有了不同程度的改善 ,日结果改善最多 ,从 11.4% 降低到 4.15% ,其中月结果改善最少 ,结果表明这种修正方法降低了 Hargreaves 方法相对 PM 法的偏差 ,并且对短时间的计算结果改进更有效果。

3 结 论

在太湖流域应用 Hargreaves 方法计算得到的 ET_0 与 PM 方法的计算结果吻合较好。Hargreaves 法结果在日、旬、月尺度上与 PM 法结果均保持了较好的变化趋势及峰值的一致性 ,误差随计算时间段的延长而减小。Hargreaves 方法在阴雨天较多的夏季计算值会明显偏高。两种方法具有很好的相关性 ,并可以此为依据建立修正方程。经过线性回归方程修正的 Hargreaves 法计算结果平均相对误差明显下降 ,并且以日 ET_0 结果改进最多。

通过对比分析以及修正 ,可以看到 Hargreaves 方法在太湖流域有着较好的适用效果 ,当有一定量的气象资料对其修正的情况下可以达到很好的精

度。Hargreaves 法计算 ET_0 简单易行 ,精度可靠 ,推荐在太湖流域应用。

参考文献 :

[1] 芮孝芳.水文学原理 [M]. 北京 :中国水利水电出版社 , 2004 :104-130.

[2] 王新华 ,郭美华 ,徐中民.分别利用 Hargreaves 和 PM 公式计算西北干旱区 ET_0 的比较 [J]. 农业工程学报 ,2006 ,22 (10) :21-25.

[3] 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.

[4] 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.

[5] ALLEN R G , PEREIRA L S , RAES D , et al. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements FAO irrigation and drainage[M]. Rome ,Italy : FAO ,1998.

[6] HARGREAVES G H , ALLEN R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. Journal of Irrigation Drainage Engineering 2003 ,129(1) 53-63.

[7] 刘钰.参照蒸发量的新定义及计算方法对比 [J]. 水利学报 ,1997(6) 27-33.

[8] WU I P. A simple evapotranspiration model for Hawaii :the Hargreaves model[C]/CTAHR F S. Engineer 's Notebook. Manoa :Agric & Human Resour ,University of Hawaii ,1997 : 106.

[9] 刘晓英 ,李玉中 ,王庆锁.几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价 [J]. 农业工程学报 ,2006 ,22(6) : 12-18.

[10] 李远华.节水灌溉理论与技术 [M]. 武汉 :武汉水利电力大学出版社 ,1999.

[11] 王声锋 ,段爱旺 ,张展羽.半干旱地区不同水文年 Hargreaves 和 P-M 公式的对比分析 [J]. 农业工程学报 , 2008 24(7) 29-33.

(收稿日期 2009-03-09 编辑 徐娟)