潜在腾发量的季节性变化趋势及概率分布特性研究*

罗 毅 雷志栋 杨诗秀

(清华大学水利水电工程系 北京 100084)

摘 要 利用北京昌平气象站多年系列观测资料和世界粮农组织 (FAO) 建议的公式计算了历年各月逐旬潜在腾发量的平均值 (ET_p)。通过分析表明, 潜在腾发量呈明显的季节性变化趋势。潜在腾发量的多年均值和标准差 (STD) 都能用 Fourier 级数的二阶分量来作很好的近似。潜在腾发量是一个随机变量, 其随机变化规律服从正态分布, 该分布的均值和标准差都随着季节而变化。

关键词 潜在腾发量 概率分布 季节变化

分类号 P332.2; O211

1 引 言

华北地区水资源供需矛盾日益尖锐, 工农业用水也日益增长。水资源的短缺已成为该地区经济发展的重大制约因素。农业用水是水资源消耗的一个重要组成部分, 因此对农业节水的研究具有极其重要的意义。开展对作物根系层中的土壤水分预测研究, 制定合理的灌溉制度, 是一项十分重要的工作。

作物根系层的水分消耗由作物的腾发以及由根系层向下的渗漏构成。作物腾发量构成其中的主要部分。所以研究作物腾发量的变化规律是进行土壤水分预报所必需的。

作物实际腾发量与潜在腾发量存在密切的关系。潜在腾发量是描述大气蒸发力的指标。影响潜在腾发量的气象因素具有随机变化的特征。利用随机理论的方法来研究作物潜在腾发量的变化规律, 从而进行土壤水分预报, 一些研究者曾作过一些工作。Aboitiz 等 (1986)[1]、Or 和 Hanks (1992)[2]、Or 和 Groeneveld (1994)[3]都曾采用时间序列分析模型来研究潜在腾发量的随机变化规律。本文利用概率论的方法来研究潜在腾发量的随机变化特性。

2 材料和方法

利用北京昌平气象站 1960 年～1991 年的历年逐旬平均气象观测资料计算潜在腾发量的旬平均值。昌平气象站海拔高程 66.1 m, 地理位置 E40°13′, N116°13′。所用的资料包括: 历年各月逐旬平均气温; 历年各月逐旬平均最高气温; 历年各月逐旬平均最低气温; 历年各月

本文于 1996 年 7 月 10 日收到, 1996 年 11 月 11 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金、“八五”重大项目资助 (No. 49391604)。

逐旬平均风速；历年各月逐旬平均相对湿度；历年各月逐旬平均日照时数。

2.1　潜在腾发量的计算

潜在腾发量 ET_p 采用修正后的 Penman 公式计算。Penman 公式的主要优点是避免了测定表面温度的困难，而且具有可靠的物理基础，已被世界许多国家广泛采用。在我国也曾利用它进行干湿气候区划分以及作物水分平衡方面的研究。FAO 在过去多年的研究及业务中也采用 Penman 公式，并根据在世界各地采用此公式中所取得的经验对原公式中的一些系数进行修正。我国对于适应我国具体情况的修正系数也进行过研究[4]。经过几十年的研究与应用，Penman 方法已成为一个利用气象参数计算潜在腾发量的好方法。修正后的 Penman 公式为

$$ET_p = \{\frac{P_0}{P}\frac{\Delta}{\gamma}[0.75R_A(a + bn/N) - \sigma T_k^4(0.56 - 0.079\sqrt{e_a})(0.1 + 0.9n/N)] + 0.26(e_s - e_a)(1 + CU_2)\}/(\frac{P_0}{P}\frac{\Delta}{\gamma} + 1) \quad (1)$$

式中　P_0、P 分别为海平面标准大气压与观测地点的实际大气压；L_H 为海拔高程，昌平气象站为 66.1 m；Δ 为饱和水汽压～温度曲线上在 T_a(℃) 下的斜率；γ 为湿度计常数；σ 为 Stefen－Boltzman 常数；e_s 为饱和水汽压；e_a 实际水汽压，实际水汽压可以由饱和水汽压和相对湿度求得；R_A 为理论太阳辐射量；N 为理论日照时数，与纬度和季节有关；n 为实际日照时数；a、b 为太阳辐射修正值，与地区条件有关；C 为风速修正系数。

2.2　潜在腾发量的季节性变化趋势分析

图 1 是昌平气象站的潜在腾发量的散点图。从图中可以看出，从每年的年初开始，随着气温的升高，日照时间的延长，太阳辐射的增强，潜在腾发量呈明显的上升趋势。一般在 5、6 月达到一年中的最大值，后逐渐减弱。这一趋势和太阳辐射年内变化趋势是比较一致的，因为潜在腾发量主要受太阳辐射的影响，太阳辐射是腾发的能量来源。由系列观测资料计算历年各月逐旬平均腾发量的均值。利用 Fourier 级数的二阶分量来描述其变化规律。图 2 给出了潜在腾发量逐旬多年平均值和标准差的变化情况。

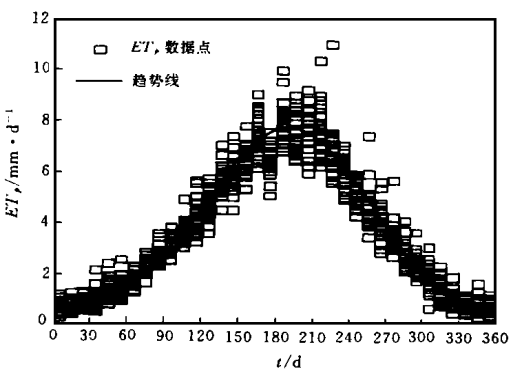


图 1　ET_p 散点图

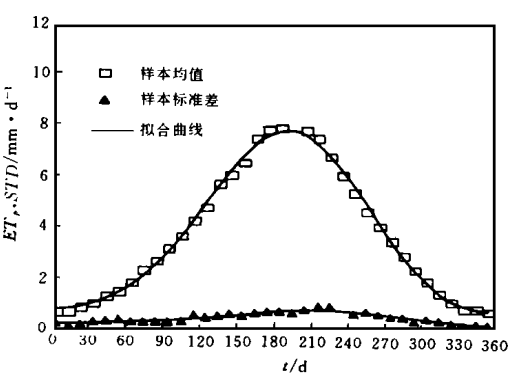


图 2　ET_p 均值和标准差及拟合值

Fig. 1.　Scattering ET_p points calculated from climatic data

Fig. 2.　Mean and STD of ET_p, and the fitted curve

$$\overline{ET_p} = \overline{\langle ET_p \rangle} + \sum_{j=1}^{2}[A(j)\cos(\frac{2\pi jt}{365}) + B(j)\sin(\frac{2\pi jt}{365})] \quad (2)$$

式中 t 为时间，以天计，年初的第一天为 1；$\overline{ET_p}$ 为潜在腾发量第 t 日的均值，mm/d；$\langle\overline{ET_p}\rangle$ 为 $\overline{ET_p}$ 年内的平均值；$A(j)$，$B(j)$ 为 Fourier 级数二阶分量的系数，由系列观测资料利用最小二乘法可以方便地求出，见表 1。

2.3 潜在腾发量系列资料的标准差分析

利用系列观测资料，逐旬计算出标准差，如图 2 所示。

标准差在年内随季节变化。在年初与年末，标准差要小一些，说明该时期潜在腾发量年际间的变化幅度相对较小。在年中标准差相对较大，说明该时期潜在腾发量年际间的变化幅度相对大些。但总的说来，标准差在年内变化幅度不是很大。

标准差在年内的变化规律也可以用 Fourier 级数的二阶分量来描述。

$$S = \langle S\rangle + \sum_{j=1}^{2}\left[SA(j)\cos\left(\frac{2\pi j t}{365}\right) + SB(j)\sin\left(\frac{2\pi j t}{365}\right)\right] \tag{3}$$

式中 S 为历年各月潜在腾发量逐旬平均值对于多年均值的标准差；$\langle S\rangle$ 为 S 年内平均值；$SA(j)$，$SB(j)$ 为 Fourier 级数二阶分量的系数，也可由系列资料利用最小二乘法方便地求出，见表 1。

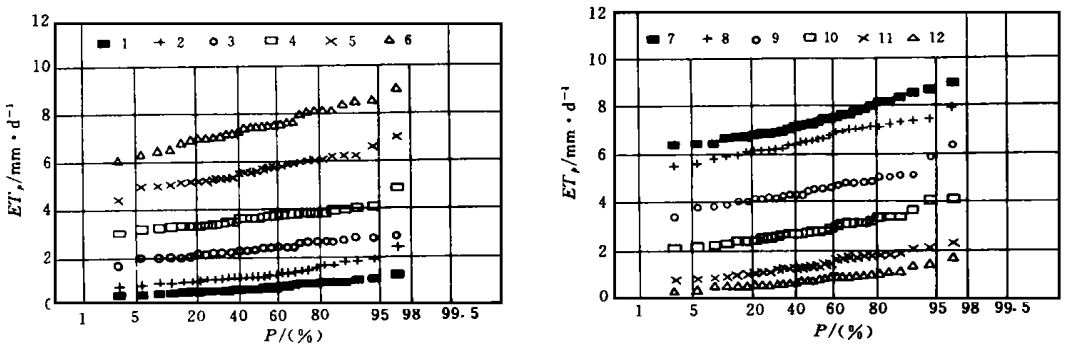
表 1 均值和标准差的 Fourier 二阶分量近似式的系数

Table 1. Coefficients of the two-harmonics approximation of Fourier series for ET_p and STD

站 名	$A(1)$	$A(2)$	$B(1)$	$B(2)$	$SA(1)$	$SA(2)$	$SB(1)$	$SB(2)$
昌平站	-3.460	0.512	-0.313	0.199	-0.254	0.014	-0.101	0.044

2.4 潜在腾发量的概率分布规律

潜在腾发量受太阳净辐射、风速、相对湿度、温度等多种气象因素的影响，它们的变化有较强的季节性变化规律，同时其变化又具有随机性。因此，受这些因素综合影响的潜在腾发量也是一个随机变量。



(1月～6月，每月中旬) (7月～12月，每月中旬)

图 3 ET_p 累积概率 (P%)

Fig. 3. Accumulated probability of ET_p

通过对多年实测系列资料的分析发现，潜在腾发量的多年随机变化近似服从正态分布。图 3 是昌平气象站潜在腾发量每月中旬平均值在正态概率纸上的累积概率，对于每一旬来说，大体成一条直线。因为均值和标准差随季节而变化，所以直线都不重合。因此可以认为潜在腾发量呈正态分布。

潜在腾发量的概率密度函数可表示为

$$f(ET_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S}\exp\left\{-\frac{(ET_p - \overline{ET_p})^2}{2S^2}\right\} \tag{4}$$

式中 $\overline{ET_p}$, S 分别为随机变量潜在腾发量的均值和标准差，它们都是时间的函数，分别由式(2)、(3)确定。

2.5　不同置信水平下潜在腾发量的置信区间分析

将潜在腾发量的分布函数化成标准正态分布。根据标准正态分布的特点，对于某一置信水平 α，随机变量置信区间可由式(5)确定

$$P\left\{\left|\frac{ET_p - \overline{ET_p}}{S}\right| \leq \lambda_\alpha\right\} = P_a \tag{5}$$

式中 ET_p 为随机变量；λ_α 为置信水平 α 下的分布特征值。

图4分别为置信水平分别为90%、95%时的置信带。

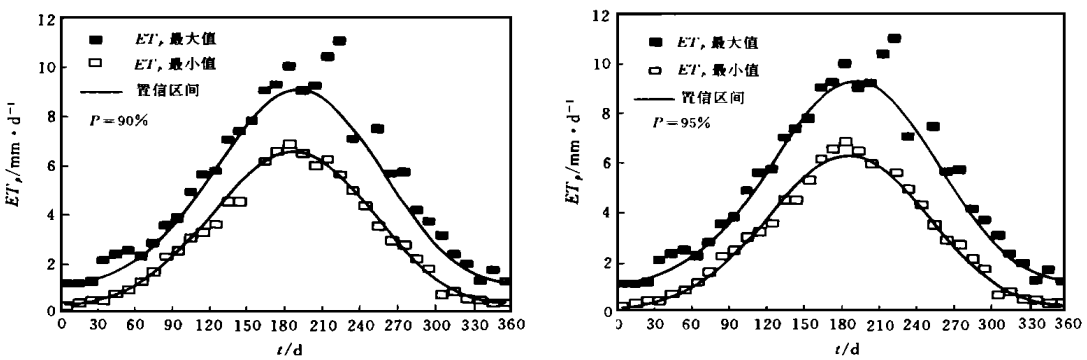


图4　ET_p 置信带

Fig. 4.　Confidence band of estimated ET_p

置信带宽度 CBW 可由(6)式表示:

$$CBW = 2\lambda_\alpha S \tag{6}$$

置信水平 α 越高，λ_α 越大，相应地 CBW 区也越大，说明对于潜在腾发量的预测精度也就越低。反之，就越高。

3　结　　论

(1) 潜在腾发量的均值呈很强的季节性变化趋势，该趋势可以用 Fourier 级数的二阶分量很好的描述。

(2) 潜在腾发量的多年标准差也呈季节性变化趋势，该趋势也可以用 Fourier 级数的二阶分量很好的描述。

(3) 潜在腾发量是一个随机变量，其多年变化规律服从正态分布。该分布的均值和标准差由文中的式(2)、式(3)确定。

(4) 潜在腾发量的变化过程是一个随机过程，如何根据系列观测值去研究潜在腾发量的随机过程性，更好地把握它的随机变化规律是进一步要进行的工作。

参 考 文 献

1 Aboitiz M, Labadie J, Heermann D. Stochastic soil moisture estimation and forecasting for irrigated fields. Water Resour. Res 1986, 22 (2): 180～190
2 Or, D, Hanks R J Spatial and temporal soil water estimation considering soil variability and evapotranspiration uncertainty. Water Resour. Res. 1992, 28 (3): 803～814
3 Or D, Groeneveld D P. Stochastic estimation of plant- available soil water under fluctuating water table depths. Journal of Hydrology. 1994, (163): 43～64
4 谢贤群, 左大康, 唐登银主编. 农田蒸发—测定与计算. 北京: 气象出版社, 1991. 134～142

Seasonal Variation Trend and Probability Distribution Pattern of Potential Evapotranspiration

Luo Yi, Lei Zhidong, and Yang Shixiu

(*Dept. of Hydraulic Engi., Tsinghua Univ., Beijing* 100084)

Abstract: Based on the serial meteorological data from Changpin Meteorological Stations located in the suburb of Beijing the every ten-day period average potential evapotranspiration (ET_p) were calculated and analyzed. The analysis shows that the ET_p changes in a strong seasonal trend of which the mean and STD fit to the two-harmonics of Fourier series approximately. Moreover, ET_p is a random variable which follows the normal distribution with mean and deviation changing with season. Finally, the probability density function of ET_p is given.

Key words: potential evapotranspiration; probability distribution; seasonal variation.

《水科学进展》与联合国出版物《自然资源论坛》建立合作关系

《自然资源论坛》(Natural Resources Forum) 是联合国主办的一份多学科国际性杂志, 在纽约联合国总部出版。它重点报道发展中国家的水的可持续发展与管理、能源和矿产资源等。研究的主题包括资源发展和管理, 资源的可利用和需求; 市场和评价; 自然资源的法律、政策和规划; 能源矿产和水资源经济; 能源保护; 乡村能源和新的及再生的能源; 基础设施的发展、金融及税收; 矿产和石油法律、政策与工业的关系等。

经商定, 1998 年起, 两种期刊除定期进行刊物交换外, 该刊还委托我刊推荐有关水资源、水环境等优秀论文在《自然资源论坛》上刊登。这是《水科学进展》继与 IHP《WATERWAY》、美国《EI》、《CA》建立信息交换关系后, 又开拓的一条国际学术交流的渠道, 为我国水科学走向世界迈出了新的一步。

(《水科学进展》编辑部)