

北京市潜在蒸散发量的时间序列变化特征分析

刘胜娅, 王会肖, 王艳阳, 叶文

(北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 区域蒸散发是一个地区气象和农业生产的重要水分指标。现采用彭曼公式计算潜在蒸散发, 研究了北京市1960年-2011年潜在蒸散发及其影响因素的变化趋势, 并对研究区潜在蒸散发时间序列变化进行了多尺度周期性分析。研究结果显示, 潜在蒸散发线性变化趋势为每年增加0.54 mm, 利用 Mann Kendall 检验得到区域蒸散发增加趋势不明显, 并且无突变点; 气温升高, 降水量下降导致蒸散发量增加, 日照时数下降导致蒸散发量下降; 总体上, 气温和降水量对北京地区蒸散发影响更大。对北京地区蒸散发进行多尺度周期分析, 发现该地区在14 a、11~12 a、5~6 a上存在周期特征, 各信号频率分布的时间域及其强度也存在着差异, 而且近15年周期特点不同于历史上以往的时期。

关键词: 潜在蒸散发; 彭曼公式; 变化趋势; 影响因子; 小波分析; 北京市

中图分类号: P426.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0013-04

Variation Characteristics Analysis of Time Series of Potential Evapotranspiration in Beijing

LIU Sheng ya, WANG Hui xiao, WANG Yan yang, YE Wen

(College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Regional evapotranspiration is an important moisture indicator of regional weather and agricultural production. In this paper, the potential evapotranspiration (*ET*) in Beijing from 1960 to 2011 was calculated using the Penman Monteith Method recommended by FAO, and the major impact factors of potential *ET* and their variation trends were investigated. Moreover, the multi scale and periodic analysis of the time series variation of potential *ET* was conducted. The results showed that (1) the potential *ET* increased with a rate of 0.54 mm per year, while the increasing trend was not apparent without mutational point from the Mann Kendall test; (2) the rising temperature and decreasing precipitation resulted in the increasing in potential *ET*, while the decreasing sunshine duration led to the reduction of potential *ET*; and (3) generally, variations of temperature and precipitation had larger effects on potential *ET*. The multi scale and periodic analysis of potential *ET* indicated that the periodic characteristics appeared at the time scales of 14 years, 11 to 12 years, and 5 to 6 years. The time domains and strengths of signal frequency distribution varied, and the periodic characteristics of potential *ET* in recent 15 years were also different from those in the past.

Key words: potential evapotranspiration; Penman Monteith Method; variation trend; impact factor; wavelet analysis; Beijing

蒸散发既是地表能量平衡的重要组成部分, 又是水量平衡的组成部分。潜在蒸散发是农田灌溉管理、作物需水量估算、稀缺资料地区水量平衡等研究中的重要参量, 分析其对气象因子的敏感性有助于农业水资源优化配置和气候变化对水资源的影响研究^[1]。用长系列蒸散发资料分析地区蒸散发变化趋势及影响因素的研究在国内不少地区开展。李林等^[2]采用彭曼公式计算20世纪80年代以来黄河上流域蒸散发量, 该流域发现蒸散发呈逐年增加趋势, 主要影响因

素为气温、空气饱和差、日照时数。于东平等^[3]分析青海省东部农业区1960年-2006年参考作物蒸散量, 得到研究区平均参考作物蒸散量随时间呈显著下降趋势, 主要影响因素为日照时数、风速等。刘昌明等^[1]研究发现全国范围内, 潜在蒸散发对气象因子的敏感性依次为水汽压、最高气温、太阳辐射、风速等。

随着小波分析对分析系统多时间尺度变化适用性的逐渐推广, 对区域蒸散发进行时间序列变化特征分析的研究越来越

收稿日期: 2012-12-10 修回日期: 2013-01-04 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.018.html>

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009SD-10)

作者简介: 刘胜娅(1989-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事生态水文方面研究。E-mail: liushengya@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 王会肖(1966-), 女, 河北石家庄人, 教授, 博士, 主要从事生态水文过程和水资源高效利用方面的研究。E-mail: huixiaowang@bnu.edu.cn

越深入。毛飞等^[4]应用 Penmar Menteith 模式计算了潜在蒸散量,并用墨西哥小波变换分析了那曲地区 1961 年—2000 年气温、降水和潜在蒸散的地理分布以及年内、年际变化规律,对研究那曲地区气候特征提供了更科学的参考。于东平等^[3]对青海省东部农业区长时间序列参考作物蒸散量进行周期性分析发现蒸散发主周期为 25 a 左右,在这个时间尺度上参考作物蒸散量表现为多→少→多 3 个循环交替的过程。

本文采用具有长系列气象资料的 54511 号、54416 号气象站对北京市的潜在蒸散发进行计算,分析其变化趋势及主要影响因素,并通过 Mann Kendall 检验、Morlet 小波分析探讨该地区潜在蒸散发量长时期的变化趋势和特征,为合理计

$$ET = \frac{\frac{P_0 \Delta}{P \gamma} [0.75R_A (a + b \frac{n}{N}) - \sigma T_k^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_d}) (0.10 + 0.90 \frac{n}{N})] + 0.26(e_a - e_d)(1.00 + Cu)}{\frac{P_0 \Delta}{P \gamma} + 1.00} \quad (1)$$

式中: ET 为某时期的潜在蒸散量(mm); P_0 为海平面平均气压(mb); P 为本站平均气压(mb); Δ 为饱和水汽压曲线在 $T = T_a$ 处的斜率(mb/°C); γ 为温度湿度计算常数 0.66; R_A 为天文辐射值(mm/d); a 和 b 为根据日照时数估算总辐射量的系数; n 为平均日照时间(h); N 为某纬度、某月天文日平均日照时间; σT_k^4 为气温 T_k 时的黑体辐射,化为蒸发当量(mm), $\sigma = 2.01 \times 10^{-8}$ (mm/(d·°C⁴)); e_a 为饱和水汽压(hPa); e_d 为实际水汽压(hPa); C 为风速系数; u 为距地面 2 m 高的平均风速(m/s)。

1.2 趋势检验方法

基于秩的非参数 Mann Kendall 统计检验法^[5,6] 常用来预测如气温、降水、径流、水质等水文气象时间序列资料的长期变化趋势^[7,9], 是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法。Mann Kendall 检验检测范围宽、定量化程度高, 计算简便, 因此本文采用 Mann Kendall 检验对 ET 序列进行趋势分析和突变分析。

1.3 周期检验方法

小波分析^[10] 是 20 世纪 80 年代初开始发展起来的一种信号时、频同时局部化分析的新方法, 能分析出时间序列周期变化的局部特性, 能更清楚的看出各周期随时间的变化情况, 所以小波分析非常适用于分析系统的多时间尺度变化。Cmor 是复数形式的 Morlet 小波, 本文采用此种小波来研究 ET 序列的特征尺度和周期性, 其小波母函数为:

$$\phi(t) = \sqrt{f_b} e^{2i\pi f_c t} e^{-x^2/f_b} \quad (2)$$

式中: f_b 为带宽参数; f_c 为小波中心频率。

2 结果与分析

2.1 年际变化特征分析

以北京市 54511 号、54416 号气象站(纬度 39°8', 经度 116°47', 海拔 31.1 m; 纬度 40°38', 经度 116°87', 海拔 71.8 m) 1960 年—2011 年、1989 年—2011 年的气象资料, 计算区域潜在蒸散发。需要获取的数据有日平均气压、平均气温、平均相对湿度、降水量、平均风速、日照时数、最高气温和最低气温。经过计算得到每日潜在蒸散发量, 转换成年蒸散发量, 分析年变化趋势见图 1。

算各种作物需水量提供科学依据, 进而制定合理的灌溉制度达到农业灌溉节水的目的。

1 计算方法

1.1 蒸散发计算方法

彭曼公式是一个根据水分输送方法和能量平衡方法相结合的半经验方法。此方法是彭曼在 1948 年根据热量平衡和湍流扩散原理提出的在无水汽平流输送情况下, 水体表面的蒸发计算公式。此公式问世以后得到广泛应用。联合国粮农组织对原公式进行了一些系数改进。本文采用改进后的公式计算有植物覆盖的区域潜在蒸散发量, 计算公式见式(1)。

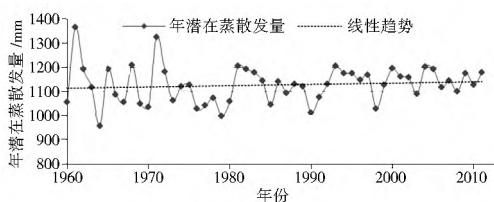


图 1 北京市潜在蒸散发年际变化

Fig. 1 The interannual variation of potential ET in Beijing

研究区 ET 多年平均年蒸发量为 1 127.8 mm。从图 1 可以看出 ET 波动范围为 957.0~1 365.9 mm, 最大值出现在 1961 年, 最小值出现在 1964 年, 而且年潜在蒸散发量的波动范围变小, 从线性趋势线可以看出年潜在蒸散发量呈增加趋势, 上升幅度为 0.54 mm/a。

对 ET 序列进行 Mann Kendall 突变性分析得到图 2。图中实线表示顺序变化曲线 UF、虚线表示逆序变化曲线 UB、两条临界线 $y = \pm 1.96$ (显著性水平为 0.05)。若 UF 大于 0 (小于 0), 则表明序列呈上升 (下降) 趋势, 当它们超过临界直线, 表明上升或下降趋势显著。研究区的计算结果为统计量 z 处于两条临界线之间 (见图 2), 说明 ET 不存在明显的变化趋势 (置信度水平为 95%)。同时, 从图 2 可以看出 ET 从下降趋势逐渐变化为上升趋势, 表现出线性趋势中隐藏的趋势。因为 UB、UF 统计量并无交叉, 说明研究区 ET 无突变点。

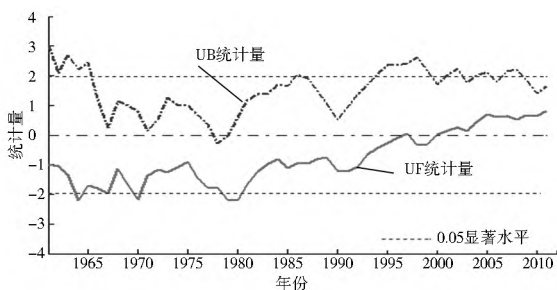


图 2 北京市潜在蒸散发年际变化趋势检验

Fig. 2 The trend test of interannual variation of potential ET in Beijing

潜在蒸散发量受平均气温、平均相对湿度、降水量、平均风速、日照时数等因素影响。为了研究这些变量综合作用对蒸散发的影响, 下面分别分析平均气温、年降水量、年日照时

数对研究区潜在蒸散发的影响。

2.2 气温对潜在蒸散发量的影响

北京人口占全国总人口的比重不到2%，但增加的人口却近1/10，增速更是全国的数倍，年均增速达3.8%。人口的增加必然增加对资源能源的使用，城市热岛效应增强，气温升高^[1]。气温越高，太阳净辐射可化为蒸散当量的数值就越高。

从图3中可以看出年平均气温呈上升趋势，上升幅度为0.044 2 °C/a。

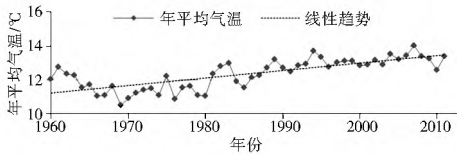


图3 北京年平均气温变化

Fig. 3 Variation of mean annual temperature in Beijing

2.3 降水量对蒸散发的影响

从图4中可以看出年降水量呈下降趋势，下降幅度为1.662 1 mm/a。降水量下降幅度大于蒸散发增加幅度。图中降水量与潜在蒸散发之间存在明显的反位相变化，降水量减少时潜在蒸散发量增加；降水量增加时潜在蒸散发量减少。这与在降水量越丰富的地区蒸散发量越小一致。

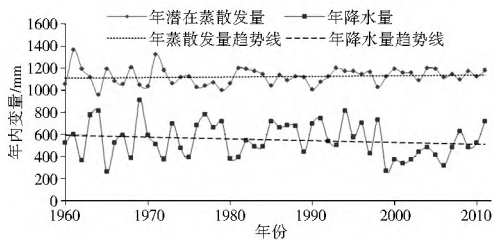


图4 潜在蒸散发量与降水量比较

Fig. 4 Comparison between potential ET and precipitation

2.4 日照时数对蒸散发的影响

太阳辐射到达地球的总热量中约有23%消耗于海洋和陆地表面的水分蒸发。据统计，大陆一年内的降水量约有60%消耗于蒸散发。日照时数影响太阳辐射的大小，太阳辐射直接供给蒸发所需能量。一般说来，日照时数越大，太阳净辐射值便越大，蒸散过程的能量供给就越充分，蒸散量也随之增大；反之，则蒸散量减小。气溶胶、大气水汽压、降水量、总云量、低云量等都是可影响日照时数的因素。

从图5中可以看出年日照时数呈下降趋势，下降幅度为14 15 h/a。对于北京地区，日照时数减少理应引起蒸散发量降低。但是日照时数所引起的蒸散发的减少量小于气温升高和降水量减少所引起蒸散发增加量，综合作用的结果是北京市蒸散发量呈增加趋势。

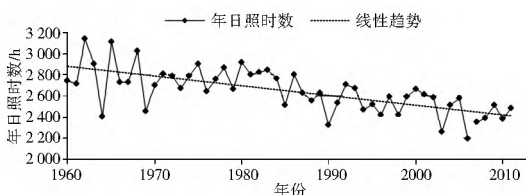


图5 年日照时数变化

Fig. 5 Variation of annual sunshine hours

2.5 周期特征分析

图6为研究区的Morlet小波变换系数实部等值线图，图中横坐标为时间，纵坐标为时间尺度(a)。小波系数实部反映不同特征时间尺度信号在不同时间的强弱和位相两方面的信息，正位相代表ET偏多的时期，负位相代表ET偏少的时期，小波系数为0则对应突变点。从图6中可以看出，研究区存在着明显的多个尺度振荡周期信号。从上至下，分析可得区域存在14 a尺度、11~12 a尺度、及6 a以下尺度。

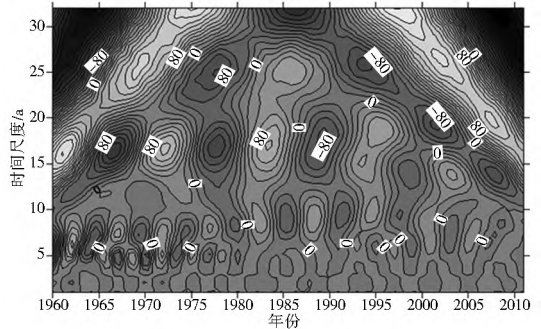


图6 复Morlet小波系数实部图

Fig. 6 The real part of Morlet complex wavelet coefficient

从较大尺度14 a分析，北京市蒸散发量在1964年以前偏小，1964年-1973年偏大，1973年-1981年偏小，1981年-1989年偏大，1989年-1998年偏小，1998年-2007年偏大，2007年-2011年等值线仍未闭合，2007年以后一段时间蒸散发量处于偏小时期。蒸散发量呈现偏大、偏小交替的3次振荡。

从10~12 a尺度分析，北京市蒸散发量1963年-1968年偏小，1968年-1974年偏大，1974年-1981年偏小，1981年-1986年偏大，1986年-1992年偏小，1992年-1996年偏大；从1996年开始振荡中心开始下移，1996年-2000年蒸散发量偏小，2000年-2005年偏大，2005年-2010年偏小。1996年以前的周期变化在整个分析时段表现得非常稳定。

10~12 a尺度的周期变化下同时嵌套了5~6 a的周期振荡。5 a周期振荡发生在1961年-1981年，具体表现为：蒸散发量1961年-1963年偏大，1963年-1966年偏小，1966年-1968年偏大，1968年-1971年偏小，1971年-1973年偏大，1973年-1976年偏小，1976年-1978年偏大，1978年-1981年偏小。1981年-1983年的6 a周期，具体表现为：研究区蒸散发量1981年-1983年偏大，1983年-1987年偏小，1987年-1990年偏大，1990年-1993年偏小，1993年-1996年偏大。

可见，1996年-2011年的蒸散发量在5~6 a尺度上周期振荡表现不明显，同时在10~12 a尺度上周期振荡中心比1996年以前的年份低。可以说明，近几年北京市蒸散发量变化不同于历史以往时期。

3 结语

北京市有植被覆盖的潜在蒸散发量从1960年-2011年呈增加趋势，每年增加0.54 mm，但增加趋势不明显。对潜在蒸散发变化相关性较大的因素有气温、降水量和日照时

数;其中北京市气温呈增加趋势,降水量和日照日数呈降低趋势。这三种因素中气温和降水量对潜在蒸散发量的影响较大,气温上升和降水量下降引起的蒸散发量增加量大于日照时数减少引起的蒸散发减少量。总体上导致潜在蒸散发量有增加趋势。北京市潜在蒸散发量在 14 a 时间尺度上成偏大偏小循环的特征,总共出现 3 次循环。在大尺度嵌套的 10~12 a、5~6 a 小尺度中,表现为 1996 年以前周期变化比较稳定,1996 年以后 10~12 a 周期振荡中心下移,而且 5~6 a 小尺度周期振荡不明显。总体上呈现振荡周期变大的趋势。

有植被覆盖的的潜在蒸散发量包括充分供水条件下植被和土壤的蒸散发,植被的类型也即土地利用方式决定着蒸散发量的大小。北京市耕地面积从 1978 年的 42.9 万 hm^2 减少到 2008 年的 23.2 万 hm^2 ,势必影响到蒸散发量的高低。本文得到北京市潜在蒸散发的总体变化趋势,而不同土地利用方式对总蒸散发的影响问题还有待于在今后的研究工作中深入探讨。

参考文献(References):

- [1] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J].地理学报,2011,66(5):579-588.(LIU Changming, ZHANG Dan. Temporal and Spatial Change Analysis of the Sensitivity of Potential Evapotranspiration to Meteorological Influencing Factors in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 579-588. (in Chinese))
- [2] 李林,张国胜,汪青春,等.黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究[J].气象,2000,(2):6-10.(LI Lin, Zhang Guosheng, Wang Qingchun, etc. Dry Climate Impact on Evapotranspiration in the Upper Valley of the Huanghe River[J]. Meteorological monthly, 2000, (2): 6-10. (in Chinese))
- [3] 于东平,张鑫,何毅,等.青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化[J].农业工程学报,2012,28(2):66-71.(Yu Dongping, ZHANG Xin, HE Yi, et al. Temporal and Spatial Variations of Reference crop Evapotranspiration in Eastern Plateau Agricultural Region of Qinghai Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 66-71. (in Chinese))
- [4] 毛飞,卢志光,张佳华,等.近 40 年那曲地区气候特征分析[J].高原气象,2007,26(4):708-715.(MAO Fei, LU Zhiguang, ZHANG Jiahua, et al. Analysis on Climate Characteristics in Naqu in Recent 40 Years[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(4): 708-715. (in Chinese))
- [5] B. M. H. Nonparametric Test Against Trend[J]. Econometrica, 1945, 13: 245-259.
- [6] G. K. M. Rank Correlation Methods: London Charles Griffin [Z]. 1975.
- [7] B. G. V, H. J. P. Nonparametric Tests for Trends in Water Quality[J]. Water Resources Research, 2001, 4(37): 987-998.
- [8] Z. Q., J. T., G. M. Precipitation, Temperature and Runoff Analysis from 1950 to 2002 in the Yangtze basin, China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2005, 1(50): 65-80.
- [9] 闫敏华,邓伟,陈泮勤.三江平原气候突变分析[J].地理科学,2003,6(23):661-667.(YAN Minhua, DENG Wei, CHEN Panqin. Analysis of Climate Jumps in the Sanjiang Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 6(23): 661-667. (in Chinese))
- [10] 程正兴,杨守志,冯晓霞.小波分析的理论、算法、进展和应用[M].北京:国防工业出版社,2007.(CHENG Zhengxing, YANG Shouzhi, FENG Xiaoxia. The Algorithm Development and Applications of Wavelet Analysis Theory[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. (in Chinese))
- [11] 林学椿,于淑秋.北京地区气温的年代际变化和热岛效应[J].地球物理学报,2005,48(1):39-45.(LIN Xuechun, YU Shuqiu. Interdecadal Changes of Temperature in the Beijing Region and Its Heat Island effect[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 39-45. (in Chinese))

《南水北调与水利科技》编辑部郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

编辑部投稿邮箱: nsbdqk@263.net, 电话: 0311-85020535, 85020639, 85020507, 85020512。

《南水北调与水利科技》编辑部