

# 近 56 年来内蒙古东胜矿区潜在蒸散发的时程变化

宁婷婷<sup>1,2</sup>, 刘文兆<sup>1,2</sup>, 林文<sup>1,2</sup>, 韩晓阳<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,  
陕西 杨凌 712100;2. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:** 采用 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散发量( $ET_0$ ),研究东胜矿区 1957—2012 年潜在蒸散发量的演变趋势,并就其时间变化序列进行频率分析和小波分析。结果表明:该区  $ET_0$  年均值为 1 128.1 mm,线性变化趋势为 0.9 mm/(10 年),经 Mann-Kendall 检验增加趋势不明显,但 2003 年可认为是突变点。 $ET_0$  的多年月均值为 94.0 mm,12 月份最小,5 月份最大。 $ET_0$  存在明显的季节变化特征,冬季最小,春秋次之,夏季最大;频率分析得出该区 56 年来的最大值(1 284.9 mm)属于 300 年一遇,而 50 年一遇的  $ET_0$  为 1 243.2 mm,10 年一遇的  $ET_0$  为 1 197.1 mm;小波分析发现,该区  $ET_0$  在 25~30 年较大尺度上的周期最明显,经历了 7 个升高—降低的循环交替,震荡主周期为 28 年,平均周期为 11.5 年左右。

**关键词:** 东胜矿区; 潜在蒸散发; 变化趋势; 重现期; 小波分析

中图分类号:S164 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2014)03-0062-05  
DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2014.03.012

## Temporal Changes of Potential Evapotranspiration in Dongsheng Mining Area in Inner Mongolia During Recent 56 Years

NING Ting-ting<sup>1,2</sup>, LIU Wen-zhao<sup>1,2</sup>, LIN Wen<sup>1,2</sup>, HAN Xiao-yang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** Based on the daily meteorological data of Dongsheng station in Inner Mongolia from 1957 to 2012, the potential evapotranspiration( $ET_0$ ) was calculated using the Penman-Monteith Method which was recommended by FAO and the trend of  $ET_0$  was also investigated. Moreover, the frequency analysis and wavelet analysis of the time series variation of  $ET_0$  was conducted. The results showed that: (1) The mean annual  $ET_0$  in the mining area was 1 128.1 mm and the linear changing trend of  $ET_0$  was 0.9 mm/(10 a). The increasing trend was not apparent from the Mann-Kendall test. However the year 2003 could be considered as an abrupt point. The monthly mean  $ET_0$  was 94.0 mm. The value in May was maximum and in December as minimum.  $ET_0$  had a distinct seasonal variation, in which winter  $ET_0$  was maximum, spring and autumn ones occupy the second place, and summer  $ET_0$  was minimum. (2) The frequency-analysis showed that the largest  $ET_0$  of this area during latest 56 years was 1 284.9 mm, which was 300 years frequency. Besides,  $ET_0$  on a 50-year-cycle and a 10-year-cycle in this area were 1 243.2 mm and 1 197.1 mm respectively. (3) The wavelet analysis indicated that there were obvious periodic oscillation of 25~30 year for the annual  $ET_0$ , which experienced 7 rising-dropping alternation circulation. The dominant period of  $ET_0$  oscillation was 28 years and the average period was about 11.5 years.

**Key words:** Dongsheng mining area; the potential evapotranspiration; the changing trend; return period; wavelet analysis

蒸散发是水文循环的重要环节,直接受气候变化及下垫面变化等的多重影响,既关系到地表水量平衡与转化过程,同时也与地表的能量平衡过程紧密相连<sup>[1]</sup>。因此准确地估算潜在蒸散量并分析其时程变化,有助于深

收稿日期:2013-12-16

基金项目:中科院西部行动计划项目“晋陕蒙能源基地受损生态系统恢复重建关键技术与示范”第一课题“水资源保护及高效利用关键技术”(KZCX2-XB3-13)

作者简介:宁婷婷(1989—),女,甘肃天水人,硕博连读生,主要从事生态水文研究。E-mail:ningting2012@126.com

通讯作者:刘文兆(1960—),男,陕西乾县人,博士生导师,研究员,主要从事土壤水分物理、流域水文生态、节水型生态农业研究。E-mail:wzliu@ms.iswc.ac.cn

入理解其对水循环影响的程度,并对水资源规划与管理、提高水资源利用效率以及保护生态环境等具有十分重要的现实意义<sup>[2]</sup>。内蒙古东胜矿区为晋陕蒙接壤区能源基地的核心区,煤炭储量丰富、煤质优良。然而,随着煤矿的开发建设,矿区原有的十分脆弱的生态环境及水资源条件进一步恶化,已成为影响矿区生态—经济—社会可持续发展的重要制约因素。协调好水资源条件与矿区开发及生态建设的关系,需要就水资源的保护与优化配置进行深入研究,其中就与水循环过程中蒸散环节紧密相关的潜在蒸散进行分析是一个重要方面。潜在蒸散发一般指充分供水条件下的区域蒸散发能力<sup>[3]</sup>。一般情况下潜在蒸散发与潜在蒸散或者潜在蒸发含义相当,但在没有植物蒸腾参与的情况下,则只能称之为潜在蒸发。FAO推荐的Penman-Monteith对潜在蒸散量(ET<sub>0</sub>)的具体定义是:潜在蒸散量是一种假象的参照作物冠层的蒸散速率,假设作物高度为0.12 m,并有固定的叶面阻力为70 s/m,反射率为0.23,相当于高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水的开阔草地的蒸散发,又称可能蒸散量或参考作物蒸散<sup>[4-6]</sup>。在全球变暖的背景下,近50年来世界各地的潜在蒸散量大多呈下降趋势,这一现象被称为“蒸发悖论”,并受到广泛关注<sup>[7]</sup>。Chattopadhyay等<sup>[8]</sup>的研究表明,近30年来印度的潜在蒸散量呈减少趋势;Thomas<sup>[9]</sup>对中国潜在蒸散量进行时空分析表明:近几十年来中国总体潜在蒸散量呈减少趋势,但西北和东南略有增加;Abteew等<sup>[10]</sup>对美国佛罗里达州南部潜在蒸散量的研究表明:近20年来该区潜在蒸散量有增加的趋势。以上研究表明在全球大的气候背景下潜在蒸散量可能呈下降趋势,但是由于各地自然条件的不同,潜在蒸散量的时程变化也存在空间上的差异性。

本文基于东胜站1957—2012年逐日气象观测数据,首先通过非参数Mann-Kendall趋势检验和突变检验对潜在蒸散量趋势特征进行分析;然后运用皮尔逊Ⅲ型水文频率曲线拟合了潜在蒸散量频率曲线,探讨了潜在蒸散量的重现期;最后利用小波分析研究了潜在蒸散量的变化周期。研究有助于深入理解气候变化对晋陕蒙地区水分循环的影响,为科学评价该区气候干湿状况、合理开发调配水资源提供科学依据。

## 1 研究资料与方法

### 1.1 资料来源

东胜煤田位于毛乌素沙漠和黄土丘陵沟壑水土流失复合侵蚀中心地带,为半干旱干草原地区,自然特点是干旱而多风沙,降雨量少且强度大,热量资源丰富,但温差变化剧烈。本文选择东胜站(39.83°N,109.98°E)作为该区代表站(具体位置见图1),地面观测逐日气象数据来自中国气象数据共享网,包括:10 m高处风速、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度和日照时间,研究时段为1957—2012年。

### 1.2 研究方法

1.2.1 Penman-Monteith公式 潜在蒸散量ET<sub>0</sub>的计算采用FAO-56推荐的Penman-Monteith公式<sup>[11]</sup>:

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

式中:ET<sub>0</sub>为潜在蒸散量(mm/d);R<sub>n</sub>为作物表面净辐射量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];G为土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];γ为湿度计常数(kPa/°C);γ为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率(kPa/°C);T为空气平均温度(°C);u<sub>2</sub>为在地面以上2 m处的风速(m/s);e<sub>s</sub>为空气饱和水汽压(kPa);e<sub>a</sub>为空气实际水汽压(kPa)。

1.2.2 非参数Mann-Kendall趋势检验和突变检验 本文采用Mann-Kendall检验对ET<sub>0</sub>序列进行趋势分析和突变检验。基于秩的非参数Mann-Kendall统计检验法常用来预测如气温、降水、径流、水质等非正态分布的水文序列资料的长期变化趋势,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检验不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,计算简便,检测范围宽,认为干扰少,定量化程度高,且能明确突变开始的时间,并指出突变区域<sup>[12-13]</sup>。

1.2.3 水文频率分析 水文随机变量究竟服从何种分布,目前还没有充足的论证。因为水文现象非常复杂,已掌握的资料较短,难以从理论上推断究竟服从何种分布类型。不过从现在掌握的资料来看,皮尔逊Ⅲ型比较符合水文随机变量的分布,因而一般采用皮尔逊Ⅲ型分布。其概率密度函数<sup>[14]</sup>为:

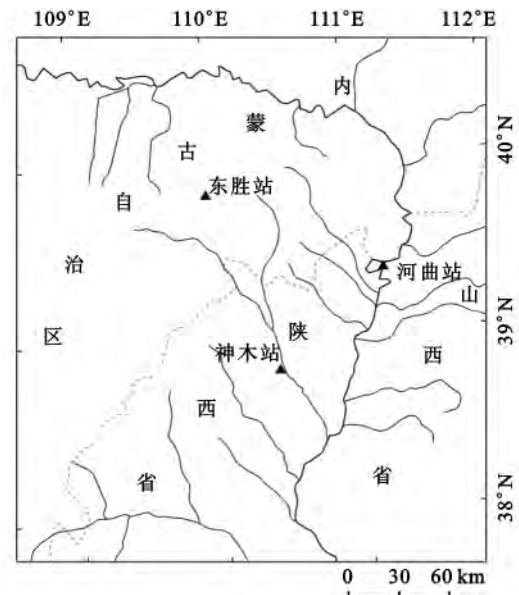


图1 研究区站点示意图

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - \alpha_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-\alpha_0)}$$

式中： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\alpha_0$  是曲线形状的 3 个参数，可通过均值、离势系数  $C_v$ 、偏态系数  $C_s$  求出。三参数确定以后则可以绘制皮尔逊 III 型概率分布曲线。

1.2.4 小波分析 小波分析在气候变化研究中显现了年与年之间、波长与波长之间的波幅变化形态与特征，已广泛地应用于气象领域，并成为研究气象要素长期变化的重要工具<sup>[15]</sup>。本文通过 Morlet 小波分析方法研究内蒙古东胜矿区近 56 年来潜在蒸散量变化规律，分析方法参照文献<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 潜在蒸散量的时程变化

2.1.1 潜在蒸散量年际变化 通过彭曼公式计算每日潜在蒸散量，再转换成年蒸散量，分析其变化趋势（图 2）。经计算得研究区多年平均潜在蒸散量为 1 128.1 mm，高于全国平均水平<sup>[17]</sup>。从图 2 可看出， $ET_0$  波动范围为 997.9~1 284.9 mm，波动范围小。最大值在 1965 年，最小值出现在 1964 年，线性回归可知近 56 年来每 10 年  $ET_0$  上升幅度仅有 0.9 mm。对  $ET_0$  序列进行 Mann-Kendall 趋势检验，统计检验值  $z = 0.311$ ，显著水平只有 24.4%，这也验证了近 56 年来东胜矿区潜在蒸散量年际间差异较大，但总体趋势变化不显著。

2.1.2 潜在蒸散量季节变化 图 3 是东胜矿区潜在蒸散量的多年逐月平均柱状图，该区多年逐月平均  $ET_0$  值为 94.01 mm，其中 12 月份值最小（23.8 mm），5 月份最大（173.9 mm）。从图 3 可以看出， $ET_0$  存在明显的季节变化特征，夏季（6—8 月）达到全年的最大值，春季（3—5 月）、秋季（9—11 月）次之，冬季（12 月—翌年 2 月）最小（夏季  $ET_0$  多年平均值为 478.6 mm，约占全年的 42.4%；春季为 352.0 mm，约占全年的 31.2%；秋季和冬季分别为 213.5 mm 和 83.0 mm，约占全年的 18.9% 和 7.4%）。四季中除夏季的潜在蒸散量以每 10 年 0.4 mm 的速度下降外，春季、秋季和冬季分别以每 10 年 0.5、0.1、0.2 mm 的速度缓慢上升，但 4 个季节的变化趋势都不显著。

### 2.2 突变分析

对  $ET_0$  序列进行 Mann-Kendall 突变检验得到图 3。图中实线表示顺序变化曲线 UF，虚线表示逆序变化曲线 UB，2 条临界线的值为  $\pm 1.96$ （为显著水平 0.05 下的  $t$  检验值）。若  $UF > 0$  则表明序列呈上升趋势，反之则为下降趋势；当超过临界线时，表明上升、下降趋势明显。如果 UF 线和 UB 线超过  $y = \pm 1.96$  信度线，并两曲线交于信度线之间，那么交点对应时间即是突变开始时刻<sup>[15,18]</sup>。由图 3 可看出，UF 线虽经过 3 个阶段变化：1957—1975 年波动上升—1975—1997 年波动下降—1997 年后又波动上升，但 UF 值始终处在  $\pm 1.96$  间，所以说整个序列无明显增长或减少趋势。UF 线与 UB 线在置信区间内共出现 3 个交点（1998 年，2003 年和 2005 年），结合该区潜在蒸散量年际变化趋势（图 2）可推断 2003 年为突变年。

### 2.3 频率分析

采用皮尔逊 III 型频率曲线对 1957—2012 年东胜矿区年潜在蒸散量进行频率分析，分析步骤如下：首先通过 56 年的  $ET_0$  值计算相应的  $p_i$  值，以纵坐标表示  $ET_0$  值，横坐标为对应的经验频率，点绘在机率格纸上，便得到了经验频率点据的分布；其次选定总体分布线型——皮尔逊 III 分布，计算离势系数  $C_v$ （本文为 0.05），再通过适线法确定偏系数  $C_s$  的值（本文为  $5C_v$ ），可得到皮尔逊 III 的理论频率曲线<sup>[12]</sup>。图 4 是根据以上步骤作出的实际频率曲线和理论频率曲线拟合图，由图 4 可以看出，两曲线拟合程度较好，说明用皮尔逊 III 分布来推算该区年潜在蒸散量的重现期及不同重现期下的极值估计结果是可信的。

用适线法确定皮尔逊 III 分布曲线后，可算出各种概率  $P$  对应的皮尔逊 III 型分布的年潜在蒸散量的理论值（也即各种重现期下的极值）。东胜矿区重现期为 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300 年对应的年潜在蒸散量依次为 1 171.9, 1 197.1, 1 218.4, 1 229.8, 1 243.2, 1 260.1, 1 275.9, 1 284.6 mm。从图 5 也可明显看出，年潜在蒸

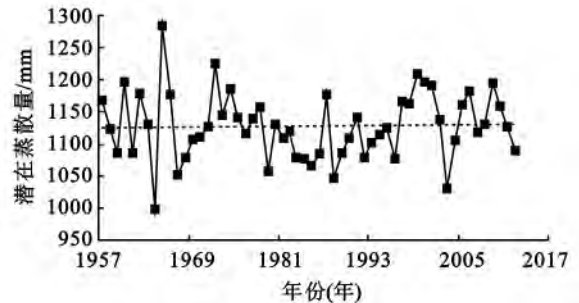


图 2 东胜矿区潜在蒸散量年际变化

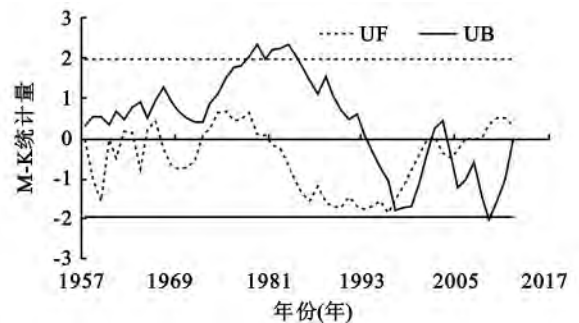
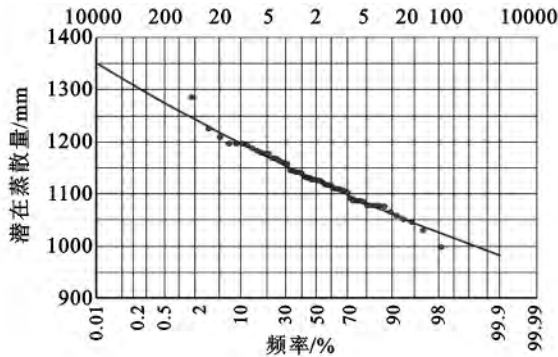


图 3 东胜矿区潜在蒸散量 Mann-Kendall 突变检验

散量的重现期极值是随重现期的增大而呈指数增长的。1,4,7,10 月理论潜在蒸散量频率分布与年值类似,但离势系数( $C_v$ )和偏态系数( $C_s$ )的值却大于年值,这说明  $ET_0$  年内变异性较大。

用东胜矿区现有的 56 年潜在蒸散量资料对比图 5 可知:56 年来该区出现的最大  $ET_0$  值为 1 284.9 mm(1965 年),属于 300 年一遇;第二大  $ET_0$  值为 1 225.1 mm(1972 年),大约属于 25 年一遇;第三大  $ET_0$  值为 1 209.6 mm(1999 年),大约属于 17 年一遇。如果年  $ET_0$  值是 1 100 mm,由图 6 估算重现期是 1.8 年左右,历史实况资料是:该区 56 年间共出现过 40 次 1 100 mm 以上的  $ET_0$  值,平均 1.5 年 1 次,与推算结果的重现期基本相同;而用相同的方法来验证  $ET_0$  为 1 160 mm 以上的重现期,得到的结果也与实际值基本相符。可见推算的东胜矿区年潜在蒸散量的重现期与本地实际重现期基本吻合。



注:均值=1128.1,  $C_v=0.05$ ,  $C_s/C_v=5.0$ 。

图 4 东胜矿区年潜在蒸散量的皮尔逊 III 分布曲线

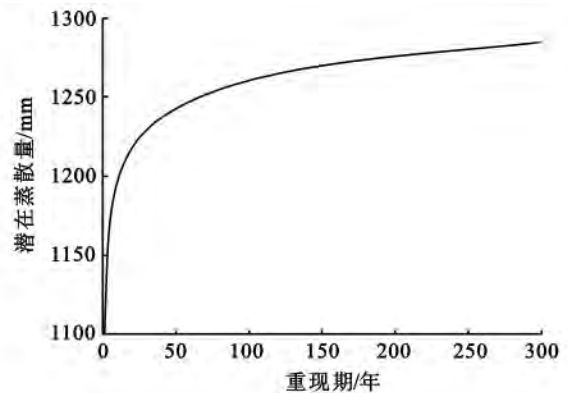


图 5 东胜矿区年潜在蒸散量的多年一遇极值曲线

### 2.4 周期特征分析

为了解潜在蒸散量的周期性变化特征,对  $ET_0$  的时间序列进行了小波分析,分析结果如图 6。Morlet 小波系数实部图表示了东胜矿区年潜在蒸散量的时间尺度特征。图 6 中,横坐标为时间(年份),纵坐标为时间尺度,图 6 中的等值曲线为小波系数实部值。当小波系数实部值为正时,代表  $ET_0$  高值期,在图中我们用实线绘出,“H”表示正值中心,为负时,表示  $ET_0$  低值期,用虚线绘出,“L”表示负值中心。信号震荡的强弱是通过等值线的密集程度来表示,等值线越密集表示  $ET_0$  比常年偏高。图 6 中清楚地显示了该地区 56 年来潜在蒸散量在不同时间尺度上的周期震荡和突变特征。由图 6 可以看出,  $ET_0$  系列存在着时间尺度上的复杂嵌套结构,小尺度变化嵌套在较大尺度的变化下。较大尺度 25~30 年上的周期震荡非常明显,期间潜在蒸散量经历了升高—降低的 7 个循环交替。其中,1962 年以前、1972—1980 年、1992—2000 年和 2007 年以后年潜在蒸散量较常年偏多,其余年份  $ET_0$  值则偏小。值得注意的是,在 25~30 年较大尺度上 2007 年以后的等值线图未闭合,据此可推断未来一段时间里  $ET_0$  值还将增大。除了较大尺度  $ET_0$  值变化存在较常年的升高—降低趋势的循环交替外,中尺度 17~22 年也存在  $ET_0$  值的升高—降低循环交替,但是幅度较小(等值线较稀疏),而小尺度周期不明显。此外,中小尺度的等值线都为实线且较稀疏,这说明在中小尺度上年  $ET_0$  有增加的趋势,但是趋势不明显。

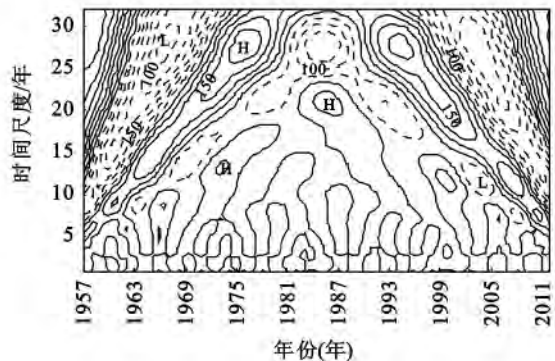


图 6 东胜矿区复 Morlet 小波系数实部图

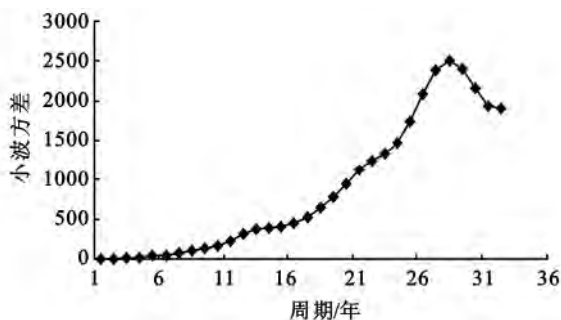


图 7 东胜矿区  $ET_0$  小波方差图

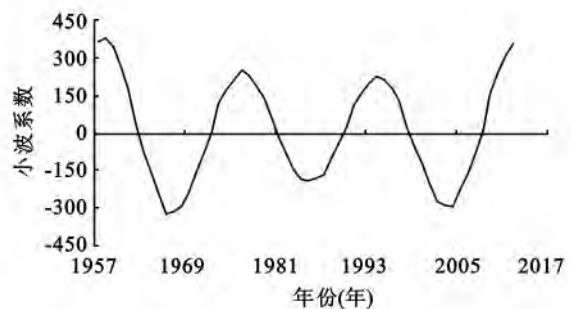


图 8 东胜矿区  $ET_0$  变化的 28 年特征时间尺度小波实部过程线

图 7 为东胜矿区  $ET_0$  小波方差图,图中仅出现了 1 个较明显的峰值——28 年,说明该地区的  $ET_0$  震荡主周期为 28 年。根据小波方差检验的结果,绘制出控制  $ET_0$  时域变化的主周期趋势图(图 8),在 28 年特征时间尺度上,该区近 56 年来潜在蒸散量的平均周期为 11.5 年左右,大约经历了 7 个  $ET_0$  值偏大—偏小转换期,该结果与小波实部图(图 6)中得到的结果相符。

### 3 讨论

除在时间序列上对东胜矿区潜在蒸散量进行纵向分析外,本文还选择了与东胜矿区邻近的 2 个站点——陕西神木站和山西河曲站(图 1)进行空间上的横向比较。2009—2012 年 3 站的年潜在蒸散量相比,神木站的  $ET_0$  值最大(1 095.7 mm),东胜站次之(1 088.8 mm),河曲站最小(1 065.4 mm)。就季节变化来看,3 站逐月变化趋势曲线很相似(图 9),说明 3 站潜在蒸散量季节变化也相似。但值得注意的是,东胜站和神木站的季节峰值出现在夏季,而河曲站峰值则出现在春季(见表 2)。从彭曼公式可知风速、气温、相对湿度和日照时间是影响潜在蒸散量大小的主要气象因子,为了探讨造成 3 站潜在蒸散量差异的原因,本文将 3 站  $ET_0$  分别与主要气象因子做相关分析发现:东胜和神木站的  $ET_0$  与最低温度的相关性最高,而河曲站与  $ET_0$  相关性最高的却是日照时间。由此可以推断:主导气象因子的不同可能是造成 3 站  $ET_0$  差异的重要原因。当然,地形条件、站点位置(离城市的远近)等也可能影响  $ET_0$  的变化,具体的影响机制还有待于进一步探讨。

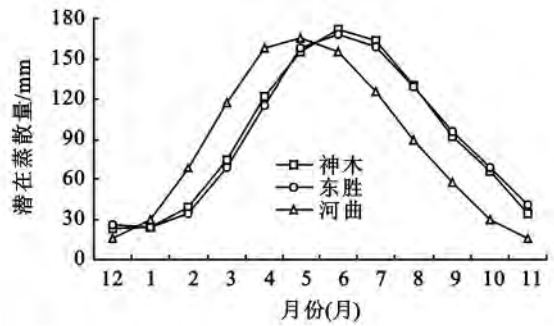


图 9 2009—2012 年 3 站  $ET_0$  逐月变化曲线

表 2 2009—2012 年 3 站  $ET_0$  季节值 mm

站点	春季	夏季	秋季	冬季	月均值
东胜	352.0	478.7	213.5	83.0	90.5
神木	351.6	465.5	191.6	87.0	91.3
河曲	440.6	370.8	103.2	112.7	85.6

已有研究表明“蒸发悖反”现象在全球范围内的存在<sup>[19]</sup>,谢贤群等<sup>[5]</sup>的研究也表明,近 50 年来中国北方潜在蒸发有减少的趋势,而本文的研究却表明近 56 年来东胜矿区的  $ET_0$  变化不明显,出现这种差异的原因可能是:一方面,计算潜在蒸散的方法不同,包括谢贤群等在内的许多研究者都是用蒸发皿来测量潜在蒸发,而本文是采用彭曼公式直接计算潜在蒸散发。Brutsaert 等<sup>[19]</sup>也指出在非湿润环境下,潜在蒸发不适宜用蒸发皿来测定;另一方面,研究尺度不同,本文的研究是基于较小尺度,而谢贤群等人的研究尺度都较大,二者是一种整体与局部的关系,结果出现差异也是合理的。

### 4 结论

本文采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算了内蒙古东胜矿区 1957—2012 年的潜在蒸散量  $ET_0$ ,并与相邻站点神木站和河曲站的  $ET_0$  值进行了同时段(2009—2012 年)的比较,在对  $ET_0$  的时间演变规律进行分析的基础上,运用 Mann-Kendall 统计检验法、小波分析和频率分析等方法对该区  $ET_0$  的变化特征做了深入探讨。主要结论为:

(1)近 56 年来东胜矿区  $ET_0$  的年均值约为 1 128.1 mm,呈增加趋势(每 10 年为 0.9 mm),但趋势不明显。多年逐月平均  $ET_0$  为 94.0 mm,12 月份最小,5 月份最大。就季节来看,夏季  $ET_0$  最大,春季和秋季次之,冬季最小。

(2)用 Mann-Kendall 突变检验可知 2003 年是 56 年来东胜矿区潜在蒸散的突变年,该年  $ET_0$  发生了由减少到增多趋势的突变;应用皮尔逊 III 概率分布推算的  $ET_0$  的重现期:20 年一遇为 1 218.4 mm,50 年一遇为 1 243.2 mm,100 年一遇为 1 260.1 mm,200 年一遇为 1 275.9 mm,56 年来的最大值(1 284.9 mm)则属于 30 年一遇。

(3)小波分析的结果表明,东胜矿区年  $ET_0$  在 25~30 年较大尺度上的周期震荡最明显,56 年经历了升高—降低的 7 个循环交替。其中,1962 年以前、1972—1980 年、1992—2000 年和 2007 年以后  $ET_0$  呈上升趋势,其余年份  $ET_0$  值则呈下降趋势。 $ET_0$  的震荡主周期为 28 年,平均周期为 11.5 年左右。

本文分析了东胜矿区潜在蒸散的时程变化特征,为晋陕蒙矿区水资源管理和气候变化的深入研究提供了重要依据。然而引起这种变化的主导因素问题还有待于在今后的研究中深入探讨。

下转第 82 页

7:3时,弃土堆置体的总产沙量与纯土堆置体相比分别降低了 29%,41%,42%。

(3)平均径流率、平均侵蚀速率与降雨强度呈线性关系,总产沙量与总径流量呈线性关系。本文中拟合了各土石比例弃土堆置体径流、产沙与降雨强度以及总径流量与总产沙量间的关系式,相关性较好。

参考文献:

- [1] 孙虎,甘枝茂.人为弃土的堆积与侵蚀过程的初步研究[J].西北地质,1998,19(1):61-66.
- [2] 陈廷方,崔鹏.西昌一攀枝花高速公路弃土土壤侵蚀预报[J].自然灾害学报,2007,17(1):109-112.
- [3] 冀秉信,王海卫,高秀娟.论开发建设项目与水土保持[J].山西科技,2002(S1):55.
- [4] 郭成久,安晓奇,武敏,等.弃土场侵蚀产沙模拟试验研究[J].中国水土保持,2010(3):29-31,60.
- [5] 孙虎,唐克丽.城镇建设中人为弃土降雨侵蚀实验研究[J].水土保持学报,1998,4(2):29-35.
- [6] 倪含斌,张丽萍,张登荣.模拟降雨试验研究神东矿区不同阶段堆积弃土的水土流失[J].环境科学学报,2006,26(12):2065-2071.
- [7] 吕春娟,白中科.黄土区大型排土场岩土侵蚀特征研究:以平朔矿区排土场为例[J].水土保持研究,2006,13(4):233-236.
- [8] 陈奇伯,黎建强,王克勤,等.水电站弃渣场岩土侵蚀人工模拟降雨试验研究[J].水土保持学报,2008,22(5):1-4.
- [9] 符素华,路炳军,叶芝茵.地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):15-18,34.
- [10] 王小燕.紫色土碎石分布及其对坡面土壤侵蚀的影响[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [11] 毛天旭,朱元骏,邵明安,等.模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J].土壤通报,2011,42(5):1214-1218.
- [12] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体的类型与特征[J].中国水土保持科学,2013,11(1):88-94.
- [13] Shainberg I, Warrington D, Laflen J M. Soil dispersibility, rain properties and slope interaction in rill formation and erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 278-283.
- [14] Igwe C A, Udegbunam O N. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria [J]. International Agrophysics, 2008, 22: 319-325.
- [15] 赵暄,谢永生,王允怡,等.模拟降雨条件下弃土堆置体侵蚀产沙试验研究[J].水土保持学报,2013,27(3):1-8.

上接第 66 页

参考文献:

- [1] 刘小莽,郑红星,刘昌明,等.海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J].资源科学,2009,31(9):1470-1476.
- [2] 左德鹏,徐宗学,李景玉,等.气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J].水科学进展,2011,22(4):455-461.
- [3] 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.
- [4] 高歌,陈德亮,任国玉,等.1956—2000年中国潜在蒸散量变化趋势[J].地理研究,2006,25(3):378-387.
- [5] 谢贤群,王菱.中国北方近50年潜在蒸发的变化[J].自然资源学报,2007,22(5):683-691.
- [6] 梁丽乔,李丽娟,张丽,等.松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J].农业工程学报,2008,24(5):1-5.
- [7] 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.
- [8] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87(1): 55-73.
- [9] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China [J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(4): 381-396.
- [10] Abtew W, Obeysekera J, Iricanin N. Pan evaporation and potential evapotranspiration trends in south Florida [J]. Hydrol. Process., 2011, 25(6): 958-969.
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56 [J]. FAO, Rome, 1998, 300: 6541.
- [12] 简虹,骆云中,谢德体.基于 Mann-Kendall 法和小波分析的降水变化特征研究:以重庆市沙坪坝区为例 [J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2011, 36(4): 217-222.
- [13] 刘盛梅,成鹏.乌鲁木齐地区近 50 年来平均气温及极端气温变化特征 [J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6): 138-146.
- [14] 刘俊民,余新晓.水文与水资源学 [M]. 中国林业出版社, 1999: 67-83.
- [15] 成鹏.乌鲁木齐地区近 50 年降水特征分析 [J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 580-587.
- [16] 薛小杰,蒋晓辉,黄强,等.小波分析在水文序列趋势分析中的应用 [J]. 应用科学学报, 2002, 33(4): 426-428.
- [17] Yin Y, Wu S, Chen G, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 101(1/2): 19-28.
- [18] 杨莲梅.新疆极端降水的气候变化 [J]. 地理学报, 2003, 58(4): 577-583.
- [19] Brutsaert W, Parlange M. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox [J]. Nature, 1998, 396(6706): 30.