

气象因子在海河流域蒸发悖论中的作用机理

鲍振鑫^{1,2}, 严小林^{1,2}, 王国庆^{1,2}, 刘翠善^{1,2}, 贺瑞敏^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029

2. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029)

摘要: 蒸发是水文循环的重要环节。利用 Mann-Kendall 趋势检验方法检测了海河流域 1961–2006 年蒸发皿蒸发量的演变趋势。结果表明:海河流域蒸发皿蒸发量呈现出显著的下降趋势。利用相关分析、偏相关分析和主成分分析方法,研究了蒸发皿蒸发量与平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数 4 种气象因子之间的关系。基于这 4 种气象因子,建立了模拟蒸发皿蒸发量的经验公式(E-THWS 公式),并利用这一公式的微分形式揭示了这 4 种气象因子在海河流域“蒸发悖论”中的作用。结果表明:平均气温和相对湿度对海河流域蒸发皿蒸发量的增加作用要小于平均风速和日照时数的减少作用;平均风速的下降是蒸发皿蒸发量下降的主要原因。

关键词: 气象因子; 蒸发皿蒸发量; 蒸发悖论; Mann-Kendall 趋势检验; 海河流域

中图分类号: P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0001-07

Mechanism of effect of meteorological factors in paradox theory of pan evaporation of Haihe River basin

BAO Zhenxin^{1,2}, YAN Xiaolin^{1,2}, WANG Guoqing^{1,2}, LIU Cuishan^{1,2}, HE Ruimin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change of MWR, Nanjing 210029, China)

Abstract: Evaporation is an important part of hydrological circulation. The Mann-Kendall's trend test technique was used to detect the trend of pan evaporation in the Haihe River basin (HRB) from 1961 to 2006. The results showed that there is a statistically significant decreasing trend of pan evaporation in the HRB. Correlation analysis, partial correlation analysis, and principal component analysis were used to analyze the relationship between pan evaporation and four meteorological factors such as mean temperature, relative humidity, wind speed and sunshine duration. The paper set up an empirical formula (E-THWS formula) for calculating pan evaporation based on the four meteorological factors, and announced the effect of four meteorological factors in paradox theory of pan evaporation of Haihe River basin. The results indicated that the increasing effect of pan evaporation by mean temperature and relative humidity is less than the decreasing effect of pan evaporation by average wind speed and sunshine duration. The decrease of average wind speed is the chief reason resulting in the decrease of pan evaporation in HRB.

Key words: meteorological factor; pan evaporation; paradox theory of pan evaporation; Mann-Kendall's test; Haihe River basin

1 研究背景

蒸发是水文循环的主要过程之一,是衡量地表水量平衡、参与地表热量平衡的重要因素,是地表水量损失的重要组成部分,涉及土壤、植被和大气等与之相关的多种复杂过程^[1]。在全球变暖的背景下,

一般预期近地表面的大气会变干,同时加上温度升高的作用,蒸发能力会增加。然而,从过去半个世纪全球蒸发皿蒸发量变化的事实来看,蒸发皿蒸发量并未明显呈现随温度升高而增加的现象,反而全球不少地区蒸发皿蒸发量呈下降趋势,例如:美国^[2]、加拿大^[3]、中国^[4]、印度^[5]、西班牙^[6]、澳大利亚^[7]

收稿日期:2014-01-03; 修回日期:2014-01-17

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2010CB951103); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2013490411); 国家自然科学基金项目(41330854、41371063、L1322014); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC21B01,2012BAC19B03)

作者简介:鲍振鑫(1985-),男,江苏南通人,博士,工程师,研究方向:气候变化与水资源。

和新西兰^[8]等。这种蒸发皿蒸发量的下降和全球气温升高之间的相反关系,被称为蒸发悖论现象,在科学界受到了广泛的关注,并引起了激烈的讨论^[9,10]。蒸发能力的变化直接影响到农业、林业、水资源和生态环境等领域,进而影响到经济社会的可持续发展。开展蒸发能力变化与模拟的相关研究,解释区域蒸发悖论现象的形成机理,对于保障粮食安全、促进水资源的可持续利用、保护生态环境和应对气候变化等方面具有重要意义。

很多学者都尝试着去解释蒸发悖论现象,并总结了几点原因:①从能量平衡的角度,由于大气中云量或者气溶胶的含量增加,使得全球太阳辐射减少,从而造成了蒸发皿蒸发量的减少;②从水量平衡的角度,基于实际蒸发和水面蒸发之间的互补关系,实际蒸发增加导致水面蒸发量减少,这主要是由于空气相对湿度增加导致饱和水汽压差减少;③从动力学角度,风速降低导致水面蒸发下降,这主要是由于全球大气环流状态的改变所致^[10-11]。Zheng 等^[12]利用 Penman-Monteith 公式的微分形式,分析了 4 种气象因子对 1957-2001 年期间海河流域的蒸发皿蒸发量下降的贡献,认为风速的下降是最主要的原因。通过分析 150 个气象站的数据,Xu 等^[13]发现 1960-2000 年期间长江流域的蒸发皿蒸发量呈现出显著的减少趋势,并利用 Penman-Monteith 公式分析了蒸发皿蒸发减少的主要原因是净辐射和风速的减少。基于 1956-2005 年中国 317 个气象站的数据,Cong 等^[11]利用逐步回归的方法分析发现 1985 年之前蒸发皿蒸发的减少主要是由于辐射和风速的减少,而 1986 年之后蒸发皿蒸发的增加则是由于饱和水汽压差的减少和气温的明显升高。然而,Liu 等^[14]认为日照时数和最高气温是影响 1959-2000 年期间中国 298 个气象站蒸发皿蒸发变化最主要的因子。分别利用基于质量和能量平衡的一般物理方程和 Penman 样式的蒸发皿蒸发模型,Roderick 等^[15]和 Rayner^[16]都发现风速的减少是 1975-2004 年期间澳大利亚蒸发皿蒸发减少的主要原因。刘翠善^[17]诊断了过去 60 年中国区域蒸发皿蒸发量的演变规律。

蒸发皿蒸发量受多种气象因子的综合影响,从影响蒸发皿蒸发量的热力条件、动力条件和水汽条件综合考虑,并经过相关分析,选择 4 个气象因子,分别为平均气温(T)、相对湿度(H)、平均风速(W)和日照时数(S)。以我国用水矛盾最为突出的海河流域为研究区域,诊断气候变化背景下的“蒸发悖

论”现象,分析平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数 4 个气象因子与蒸发皿蒸发量(E_{pan})的相关关系,建立蒸发皿蒸发量的模拟公式,并揭示这 4 个气象因子在海河流域蒸发悖论形成中的作用。

2 研究区概况与数据资料

2.1 海河流域概况

海河流域位于中国北方,东经 $112^{\circ} \sim 120^{\circ}$,北纬 $35^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 之间,西以山西高原与黄河流域交界,北以蒙古高原与内陆河流域交界,南靠黄河,东临渤海。流域包括了北京、天津,河北省绝大部分,山西省东部,山东、河南省北部,辽宁省及内蒙古自治区的一部分。流域面积为 32 万 km^2 ,占全国总面积的 3.3%。流域属于温带东亚季风气候区,年平均气温在 $0 \sim 14.5^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 535 mm,是我国东部沿海降水最少的地区,属半湿润半干旱地带,年平均陆面蒸发量 470 mm,水面蒸发量 1 073 mm。年平均气温与年降水量基本上从东南沿海向西北内部依次递减,但是在流域西部和东北部山区迎风坡前有两个年降水量极值中心。2005 年流域总人口 1.34 亿,占全国的 10.2%,国内生产总值(GDP)25 750 亿元,占全国的 14.1%,人均 GDP 为 1.92 万元,高出全国平均水平 1.38 倍。海河流域人口密集,大中城市众多,是我国重要的工业基地和高新技术产业基地,在我国政治经济中占有重要的地位。

2.2 数据资料情况

选取了海河流域内的 28 个气象站,包括 1961-2006 年日过程的蒸发皿蒸发量、平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数资料。这些气象资料由中国气象局发布,具有很好的科学性和准确性。

3 方法

3.1 Mann-Kendall 趋势检验方法

Mann-Kendall 秩次相关检验是一种非参数统计检验方法,由 Mann H B 和 Kendall M G 提出,它能够检测水文气候要素演变趋势的显著性水平。由于具有能够处理非正态分布数据、不受少数异常值的干扰、计算简单等优点,Mann-Kendall 趋势检验方法在很多领域得到了广泛的应用,其计算步骤如下:

①给定原假设 H_0 ,样本序列没有显著上升或者下降趋势。

②构造 Mann-Kendall 统计量 UF_i ,来检验原假设是否成立,其计算公式为:

$$UF_i = \frac{S_i - E(S_i)}{\sqrt{Var(S_i)}} \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{1}$$

其中:

$$S_i = \sum_{k=1}^i r_k \quad (i = 2, 3, \cdots, n) \tag{2}$$

$$r_k = \begin{cases} +1, & x_k > x_j \\ 0, & x_k \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \cdots, k-1) \tag{3}$$

式中: x_i 是样本容量为 n 的系列。如果它服从独立同分布且随机,则 S_i 的期望值和方差可由下式计算:

$$E(S_i) = \frac{i(i-1)}{4}$$

$$Var(S_i) = \frac{i(i-1)(2i+5)}{72} \tag{4}$$

③ 给定一个显著性水平 α ,由正态分布表可以查的临界值 $U_{\alpha/2}$ 。当 $|UF_i| < U_{\alpha/2}$ 时,接受原假设,即趋势不显著;当 $|UF_i| > U_{\alpha/2}$ 时,拒绝原假设,即趋势显著。而且, $UF_i > 0$ 表示序列呈上升趋势; $UF_i < 0$ 表示序列呈下降趋势。

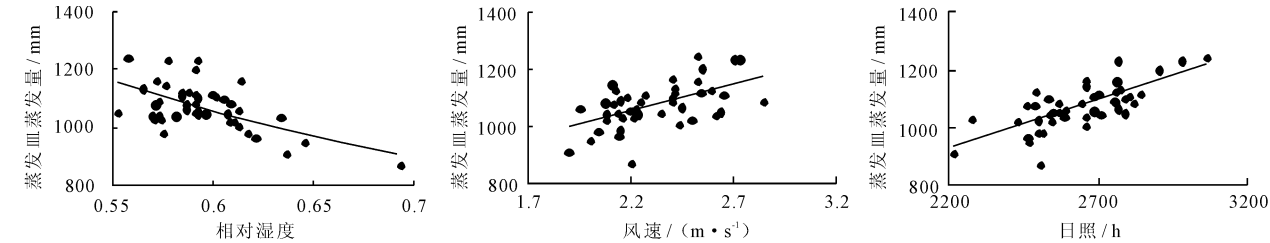


图 1 年蒸发皿蒸发量与相对湿度、平均风速和日照时数的关系

3.3 蒸发皿蒸发量变化归因分析

蒸发皿蒸发量的变化 (ΔE_{pan}) 由 4 个气象要素的变化引起:

$$\Delta E_{\text{pan}} = \Delta E_{\text{pan}}(T) + \Delta E_{\text{pan}}(H) + \Delta E_{\text{pan}}(W) + \Delta E_{\text{pan}}(S) \tag{7}$$

式中: $\Delta E_{\text{pan}}(T)$, $\Delta E_{\text{pan}}(H)$, $\Delta E_{\text{pan}}(W)$ 和 $\Delta E_{\text{pan}}(S)$ 分别为平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数变化导致的蒸发皿蒸发量的变化。以平均气温为例, $\Delta E_{\text{pan}}(T)$ 为:

$$\Delta E_{\text{pan}}(T) = \frac{dE_{\text{pan}}}{dT} \Delta T \tag{8}$$

式中: $\frac{dE_{\text{pan}}}{dT}$ 为蒸发皿蒸发量对平均气温的敏感性,可由 E-THWS 公式计算; ΔT 表示平均气温的变化,由观测资料计算。同理可以计算出 $\Delta E_{\text{pan}}(H)$, $\Delta E_{\text{pan}}(W)$ 和 $\Delta E_{\text{pan}}(S)$ 。

4 结 果

4.1 蒸发皿蒸发量演变规律

利用海河流域内 28 个国家基本气象站点的实测

3.2 蒸发皿蒸发模拟公式

蒸发皿蒸发量受到气温、风速等气象要素的影响。由于缺少辐射资料,本文选用平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数 4 个气象要素来构建模拟蒸发皿蒸发量的经验公式。蒸发皿蒸发量通常与饱和水汽压 (e_s) 成正比例关系,而 e_s 可由平均气温来估计^[1]:

$$e_s = 0.618 \exp\left(\frac{17.27 T}{237.3 + T}\right) \tag{5}$$

观测的年平均资料表明,蒸发皿蒸发量与相对湿度成反比关系,而与平均风速和日照时数成正比关系(图 1)。从而构建了模拟月蒸发皿蒸发量的经验公式(E-THWS):

$$E_{\text{pan}} = \frac{a \exp\left(\frac{17.27 T}{237.3 + T}\right)}{1 + \frac{H}{\bar{H}}} \left(1 + \frac{W}{\bar{W}}\right) \left(1 + \frac{S}{\bar{S}}\right) \tag{6}$$

式中: $\bar{H}$, $\bar{W}$, $\bar{S}$ 分别是相对湿度、平均风速和日照时数的年平均值; a 是需要由观测资料率定的公式参数。

气象资料,分析了海河流域蒸发皿蒸发量的历史演变规律。海河流域多年平均蒸发皿蒸发量为 1 073 mm。从蒸发皿蒸发量的年内分配过程来看,5 和 6 月的蒸发皿蒸发量最大,都达到了 165 mm;1 和 12 月的蒸发皿蒸发量最小,为 24 mm。过去 46 年中,海河流域的年蒸发皿蒸发量呈现出显著的减少趋势,其递减速率为每 10 年减少 22.9 mm(图 2)。

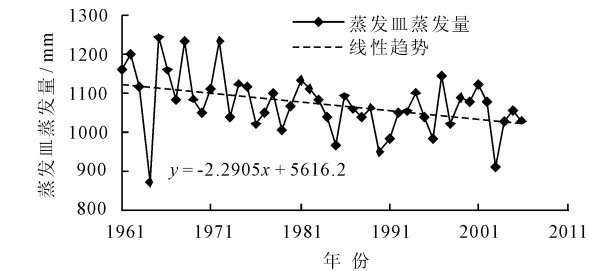


图 2 海河流域 1961 - 2006 年蒸发皿蒸发量的历史演变规律

流域年蒸发皿蒸发量在 20 世纪 60 年代变化趋势不明显,70 年代初开始迅速下降,80 年代初降到均值以下,并继续呈微弱减少趋势。年蒸发皿蒸发量的 Mann-Kendall 检验值为 -2.98 mm,表明减少

趋势显著,达到了1%的显著性水平(图3(a))。除了2和3月,有10个月的蒸发皿蒸发呈现减少趋势,其中5和6月达到了1%的显著性水平。流域

内28个气象站中,有22个站的蒸发皿蒸发量呈现减少趋势,其中有14个站达到了5%的显著性水平,6个气象站的增加趋势都不显著(图3(b))。

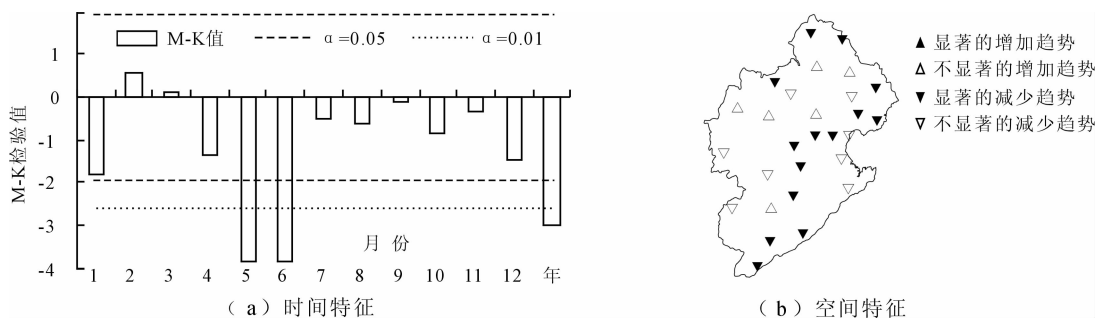


图3 海河流域蒸发皿蒸发量 M-K 趋势检验结果

4.2 气象要素演变规律

(1)平均气温。过去46年中,海河流域的年平均气温呈现出显著的上升趋势,其增温速率为每10年增加 0.32°C (图4)。年平均气温的 Mann-Kendall 检验值为5.7,表明增加趋势显著,达到了1%的显著性水平(图5)。12个月的平均气温都呈现出增加趋势,其中分别有10个月和8个月的增加趋势达到了5%和1%的显著性水平。1月的增温趋势最大,7月的增温趋势最小。总体而言冬季的增暖趋势最明显,而夏季最弱。流域内28个气象站中有27个站呈现出增加趋势,其中有26个站的显著性

水平达到了5%(图6)。

(2)相对湿度。过去46年中,海河流域的相对湿度呈现出减少趋势,其递减速率为每10年下降0.5%(图4)。年相对湿度的 Mann-Kendall 检验值为-1.95,表明减少趋势不显著(图5)。12个月中,有4个月呈现出增加趋势,但都不显著;在呈现减少趋势的8个月中,3和7月达到了5%的显著性水平,8月达到了1%的显著性水平。空间上大多数气象站呈现减少趋势,仅有位于东部和南部的几个站呈现出增加趋势(图6)。

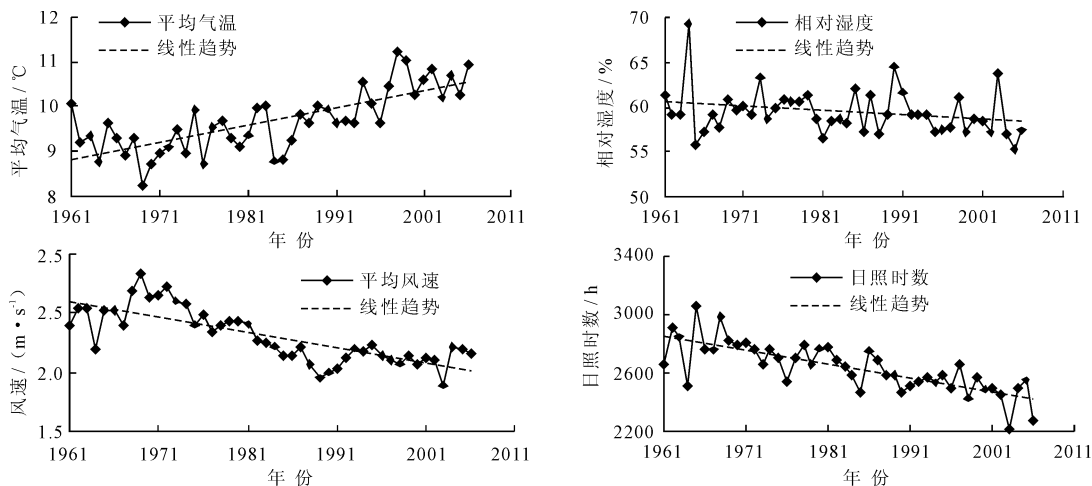


图4 年平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数的历史演变趋势

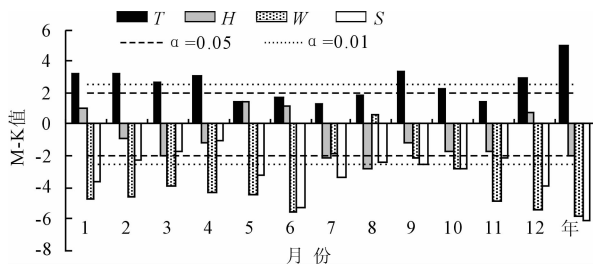


图5 平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数的月、年趋势检验

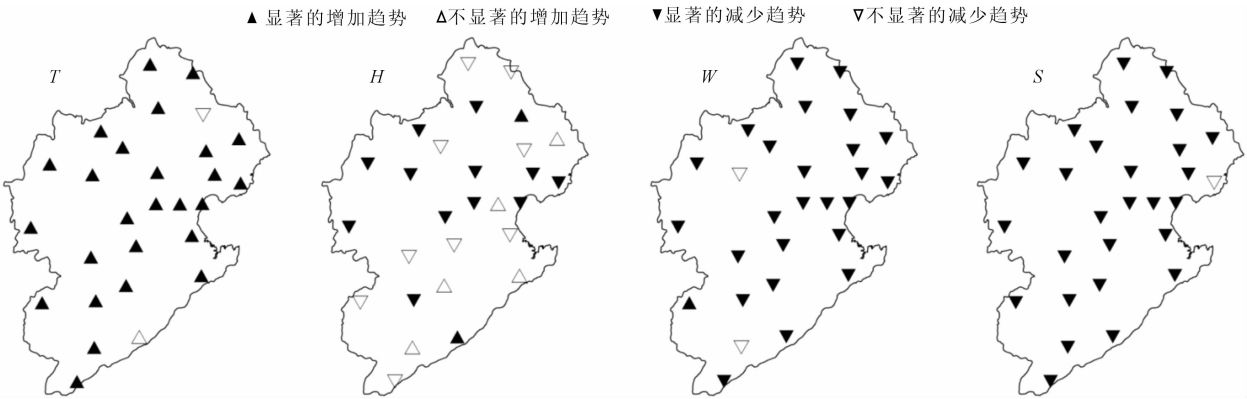


图 6 平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数趋势检验空间分布

(3)平均风速。过去 46 年中,海河流域的平均风速呈现出减少趋势,其递减速率为每 10 年减少 0.13 m/s(图 4)。Mann-Kendall 检验结果表明年平均风速的减少趋势显著,达到了 1% 的水平(图 5)。除了 8 月外,有 11 个月的平均风速呈现减少趋势,其中分别有 10 个月和 9 个月达到了 5% 和 1% 的显著性水平。总体而言夏季的递减趋势最小。除了 1 个位于流域西南部的气象站之外,其他 27 个站都呈现出减少趋势,其中有 25 个站的减少趋势显著(图 6)。

(4)日照时数。过去 46 年中,海河流域的年日照时数呈现出显著的减少趋势,其递减速率为每 10 年减少 95.6 h(图 4)。年日照时数的 Mann-Kendall 检验值为 -6.1,表明减少趋势显著,达到了 1% 的水平(图 5)。12 个月的日照时数都呈现出减少趋势,其中分别有 10 个月和 6 个月达到了 5% 和 1% 的显著性水平。所有的 28 个气象站都呈现出减少趋势,只有 1 个站的趋势不显著(图 6)。

4.3 蒸发皿蒸发量与气象要素相关分析

(1)Pearson 相关分析。Pearson 相关分析是分析蒸发皿蒸发量影响因子的简单常用方法。海河流

域蒸发皿蒸发量与气象因子之间的相关系数见图 7。蒸发皿蒸发量与平均气温 ($r = 0.04$)、平均风速 ($r = 0.56$) 和日照时数 ($r = 0.73$) 呈正相关;与相对湿度呈负相关 ($r = -0.58$)。总体上,蒸发皿蒸发量与相对湿度、平均风速和日照时数的相关性较高,通过了显著性检验;而蒸发皿蒸发量与平均气温的相关性较差。

(2)偏相关分析。通过偏相关分析,计算出海河流域蒸发皿蒸发量与气象因子之间的偏相关系数图 8。偏相关系数的大小反映了蒸发皿蒸发量与气象因子之间关系的相关程度。偏相关系数越大,则相关程度越高。根据偏相关分析成果,可得到以下结论。扣除其它变量的影响后,海河流域的平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数均与蒸发皿蒸发量有较好的关系,其中日照时数的相关性最强。平均气温、平均风速和日照时数与蒸发皿蒸发量呈正相关;而相对湿度与蒸发皿蒸发量呈负相关。

(3)主成分分析。根据主成分分析法,对蒸发皿蒸发量的影响因子进行主成分分析,海河流域蒸发皿蒸发量影响因子的各个主成分方差贡献率见图 9。

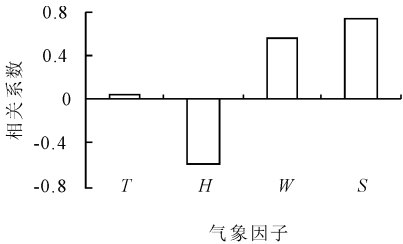


图 7 蒸发皿蒸发量与气象因子的 Pearson 相关系数

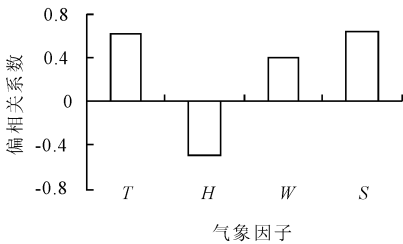


图 8 蒸发皿蒸发量与气象因子的偏相关系数

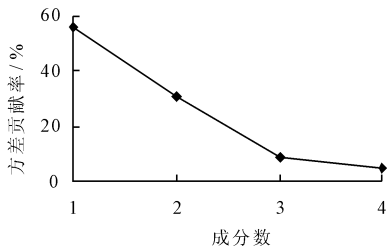


图 9 蒸发皿蒸发量影响因子主成分方差贡献率

从图 9 中可以看出第一、二主成分的方差贡献率为 56% 和 30%。前两个主成分的累积方差贡献

率为 86%,所以本文取前两个主成分来代替原有的 4 个气象因子。从表 1 中的因子荷载矩阵可以看

出,在第一主成分中,平均气温、平均风速和日照时数的作用较大,其中风速的作用最大,它反映的是影响蒸发皿蒸发量的热力条件和动力条件。在第二主成分中,相对湿度的作用较大,它反映的是影响蒸发皿蒸发量的水汽条件。总体而言风速对海河流域蒸发皿蒸发量的影响最大,其次是日照时数和平均气温,相对湿度的影响最小。

表 1 因子负荷矩阵				
气象因子	成分数			
	1	2	3	4
T	-0.77	-0.45	0.44	-0.02
H	-0.05	0.96	0.28	0.07
W	0.93	-0.05	0.21	-0.31
S	0.88	-0.30	0.18	0.31

4.4 气象因子在“蒸发悖论”中的作用

选用 1961 - 1996 年的资料来率定 E-THWS 公式中的参数 a ,1997 - 2006 年的资料来检验公式对于海河流域月蒸发皿蒸发量的模拟效果,结果见表 2。在率定期和检验期,相对误差分别为: $-1.63 \times 10^{-7}\%$ 和 0.44% ;而 N_{sc} 都高达 0.948。率定期模拟的月蒸发皿蒸发量过程见图 10(a)。可见,除了几个峰值的模拟有所偏差以外,模拟值和观测值的吻合程度很高。模拟的全时期蒸发皿蒸发量的年过程和观测值十分吻合,呈现了相同的下降趋势(图 10(b))。

表 2 E-THWS 公式模拟的月蒸发皿蒸发量 /%			
时期	时间段	Re	N_{sc}
率定期	1961 - 1996	-1.63×10^{-7}	0.948
检验期	1997 - 2006	0.44	0.948

注: Re 是相对误差,其计算公式为: $Re = (V_{sim} - V_{obs}) / V_{obs} \times 100\%$ 。 V_{sim} 和 V_{obs} 分别表示模拟和观测的蒸发皿蒸发量总量。 N_{sc} 是 Nash-Sutcliffe 效率系数,表示模拟结果的优劣,其计算公式为: $N_{sc} = 1 - \sum (E_{sim} - E_{obs})^2 / \sum (E_{obs} - \bar{E}_{obs})^2$ 。 E_{sim} 和 E_{obs} 是模拟和观测的蒸发皿蒸发量, $\bar{E}_{obs}$ 是观测蒸发皿蒸发量的平均值。

利用率定好的 E-THWS 公式,根据其微分形式来分析 4 个气象要素对蒸发皿蒸发量变化的贡献,结果见图 11。其中平均气温的升高和相对湿度的下降分别导致蒸发皿蒸发量上升了 10.5% 和 2%;而平均风速和日照时数的下降分别导致蒸发皿蒸发量下降了 13% 和 8%。这表明,平均气温和相对湿度对蒸发皿蒸发的增加作用要小于平均风速和日照时数的减少作用,平均风速的下降是蒸发皿蒸发量下降的主要原因。

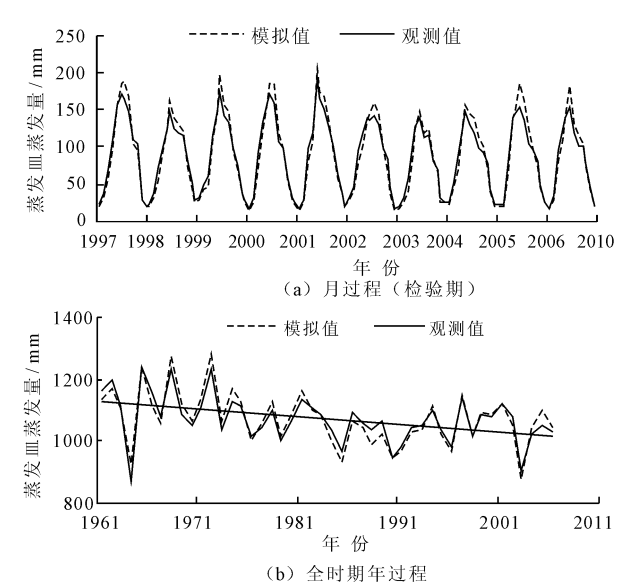


图 10 模拟的检验期蒸发皿蒸发量月过程和全时期年过程图

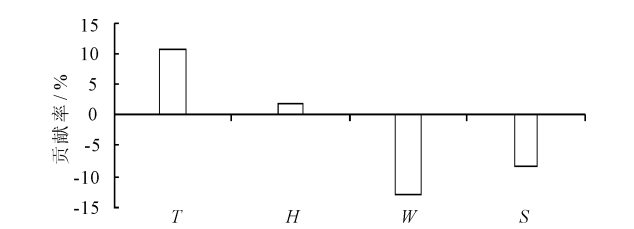


图 11 4 个气象要素对海河流域蒸发皿蒸发量变化的贡献

5 结 语

蒸发悖论现象是全球变化研究中的热点问题。本文以海河流域为研究对象,分析了 1961 - 2006 年海河流域蒸发皿蒸发量的演变规律,研究了蒸发皿蒸发量与平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数之间的相关关系,并揭示了这 4 种气象因子在海河流域蒸发皿蒸发量下降中的贡献,主要结论如下:

- (1) 1961 - 2006 年中,海河流域的年蒸发皿蒸发量呈现出显著的减少趋势,达到了 1% 的显著性水平;在年内分布上以 5、6 月份的下降趋势最为明显;空间上以流域东南部的下降趋势最为明显。
- (2) 1961 - 2006 年中,海河流域的年平均气温呈现出显著的上升趋势,达到了 1% 的显著性水平;相对湿度呈现出不显著的减少趋势;平均风速呈现出显著的下降趋势,达到了 1% 的显著性水平;同时日照时数也呈现出显著的下降趋势,达到了 1% 的显著性水平。
- (3) 平均气温、平均风速和日照时数与蒸发皿蒸发量呈正相关;而相对湿度与蒸发皿蒸发量呈负相关。动力条件和热力条件对海河流域蒸发皿蒸发量的影响较大,而水汽条件的影响较小。

(4)平均气温的升高和相对湿度的下降分别导致蒸发皿蒸发量上升了10.5%和2%;而平均风速和日照时数的下降分别导致蒸发皿蒸发量下降了13%和8%,平均风速的下降是海河流域蒸发皿蒸发量下降的主要原因。

参考文献:

- [1] Maidment D R. Handbook of hydrology [M]. R. R. Donnelley & Sons Company, New York, USA, 1993.
- [2] Lawrimore J H, Peterson T C. Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2000, 1(6): 543 – 546.
- [3] Burn D H, Hesch N M. Trends in evaporation for the Canadian Prairies [J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(1): 61 – 73.
- [4] Liu B, Xu M, Henderson M, et al. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955 – 2000 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 – 2012), 2004, 109: D15102.
- [5] 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.
- [6] Moratiel Yugueros R, Duran Altisent J M, Snyder R L. Responses of reference evapotranspiration to changes in atmospheric humidity and air temperature in Spain [J]. Climate research, 2010, 44(1): 27 – 40.
- [7] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002 [J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(9): 1077 – 1090.
- [8] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(15): 2031 – 2039.
- [9] Peterson T V. Evaporation losing its strength [J]. Nature, 1995, 377: 687 – 688.
- [10] Fu G, Charles S P, Yu J. A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years [J]. Climatic Change, 2009, 97(1 – 2): 193 – 214.
- [11] Cong Z T, Yang D W, Ni G H. Does evaporation paradox exist in China? [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2009, 13(3): 357 – 366.
- [12] Zheng H, Liu X, Liu C, et al. Assessing contributions to pan evaporation trends in Haihe River Basin, China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 – 2012), 2009, 114: D24105.
- [13] Xu C, Gong L, Jiang T, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1): 81 – 93.
- [14] Liu Q, Yang Z, Xia X. Trends for pan evaporation during 1959 – 2000 in China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1934 – 1941.
- [15] Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D, et al. On the attribution of changing pan evaporation [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34: L17403.
- [16] Rayner D P. Wind run changes: the dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia [J]. Journal of Climate, 2007, 20(14): 3379 – 3394.
- [17] 刘翠善. 我国不同气候区蒸发能力模拟及其对气候变化的响应 [D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.