

# 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析

郭 军<sup>1</sup>, 任国玉<sup>2</sup>

(1. 天津市气象局气候服务中心, 天津 300074; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

**摘要:** 利用研究区 1956 - 2000 年 117 个气象台站的小型蒸发皿观测资料, 分析了黄淮海流域蒸发量的变化趋势及其可能原因。结果表明, 近 50 年来本区蒸发量减少十分显著, 其变化速率一般在 - 50 mm/10a, 平原地区最大变化速率达到 - 80mm/10a 以上。蒸发量下降最明显的季节是春季和夏季, 其中春季减少最大区域主要在海河流域的东南部和黄河下游, 而夏季的减少主要在淮河流域。造成蒸发量减少的直接气候原因可能是日照时数及太阳辐射的减少, 平均风速和气温日较差的降低可能也起着重要的作用。

**关 键 词:** 蒸发量; 气候变化; 黄淮海流域; 变化特征

**中图分类号:** P426.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2005)05-0666-07

气候变化特别是气温和降水的变化对水资源的影响已有了大量的研究<sup>[1,2]</sup>, 但就水资源平衡关系而言, 影响水资源变化的不仅仅是气温和降水, 其他气候要素对水资源的变化也具有很重要的作用。蒸发是水循环中重要组成部分, 它和降水、径流一起决定着一个地区的水量平衡。气温一般是通过蒸发间接影响区域水量平衡。当全球平均气温升高时, 通常会认为空气将变得干燥, 而且陆面水体的蒸发量也会增加。然而, 尽管已经观测到北半球近 50 年来区域平均气温以 0.15 /10a 的速率增温<sup>[2]</sup>, 但是 Menne 等<sup>[3]</sup>却发现 1950 - 1990 年美国和前苏联的蒸发皿蒸发量存在稳定的下降趋势。有很多科学家从不同的角度探讨了蒸发量减少的原因<sup>[4~6]</sup>, 他们多数认为太阳辐射的减少是主要原因。黄淮海流域的降水量在近 20 年里明显减少, 这是造成气候持续干旱的重要原因。但是, 对于本区蒸发量变化的研究还不多。本文利用气象台站资料, 对黄淮海流域蒸发量变化趋势进行分析, 并对造成蒸发量变化的气候因子进行讨论。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料来源

黄淮海流域位于 32°~42°N、110°~120°E, 涉及北京、天津、河北、山西、河南、山东、江苏、安徽等省市, 区域内有 117 个气象站, 站点分布见图 1。

本文所用地面气象资料均由国家气象资料中心提供逐月(1956 - 2000 年)的小型蒸发皿蒸发量、日照时数、平均风速、相对湿度、平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量等。小型蒸发皿高 10 cm、直径 20 cm, 是气象部门常用的观测仪器, 用这种仪器观测的蒸发量, 在湿润小风气候条件下与实际蒸发量比较接近; 但在干旱气候或旱季, 由于蒸发皿中水体小, 日晒和风吹会使蒸发量观测值显著偏大。虽然蒸发皿蒸发量不能确切代表真实水体的蒸发, 更不能代表地表的土壤水分的蒸发(蒸腾), 但对于了解蒸发量的变化规律和趋势还是有价值的, 对于深入了解气候变化对水资源的影响具有重要的意义。

### 1.2 计算方法

**气候变化速率** 在计算变化趋势时, 采用最小二乘法, 计算样本与时间的线性回归系数( $\lambda$ ), 即

收稿日期: 2004-06-30; 修订日期: 2004-09-15

作者简介: 郭 军(1966 - ), 男, 天津人, 天津市气象局气候服务中心高级工程师, 主要从事气候变化方面研究。

E-mail: tjqh2002@yahoo.com.cn

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (t_i y_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (1)$$

式中  $y_i$  为各要素时间序列； $t_i$  为时间 ( $t_i = 1, 2, \dots$ )； $n$  为序列长度，本文取  $n = 45$ 。以  $10 \times$  作为分析气候变化速率，如蒸发量，则单位为  $\text{mm}/10\text{a}$ 。

**区域平均序列** 在计算各要素区域平均时间序列时，采用 Jones 等<sup>[7]</sup>提出的方法。把黄淮海流域整个区域按经纬度划分为  $2^\circ \times 2^\circ$  的网格，将每个网格内所有站点的数据作算术平均，得到各网格的值，然后将各网格的值应用面积加权平均法，得到黄淮海流域各要素的时间序列，公式为

$$Y_k = \frac{\sum_{i=1}^m (\cos \varphi_i) \times Y_{ik}}{\sum_{i=1}^m \cos \varphi_i} \quad (2)$$

式中  $Y_k$  为第  $k$  年区域平均值； $i = 1, 2, \dots, m$  ( $m$  为网格数)； $Y_{ik}$  为第  $i$  个网格中第  $k$  年的平均值； $\varphi_i$  为第  $i$  个网格中心的纬度。

在处理日照时数、平均风速、相对湿度、平均气温、平均最高气温、平均最低气温时，采用距平的方法，即将各个站逐年值针对 1971 - 2000 年 30 年平均值计算差值。将缺测年剔除，再计算各网格平均值，根据式(2)得到黄淮海流域区域内的平均距平序列。

在计算蒸发量和降水量时，采用标准化的方法滤去影响因子，得到量纲为一的序列。计算标准化公式为

$$P_{ik} = \frac{P_{ik} - \bar{P}_i}{\sigma_i} \quad (3)$$

式中  $P_{ik}$  为第  $i$  个站第  $k$  年的标准化值； $\bar{P}_i$  为第  $i$  个站的 1971 - 2000 年 30 年平均值； $\sigma_i$  为第  $i$  个站的标准差。然后根据式(2)得到黄淮海流域区域平均蒸发量和降水量序列。通过式(3)计算所得的序列还可以用式(4)转换回到以  $\text{mm}$  为单位的序列。

$$\bar{P}_k = (\sigma_k)^{-1} + \bar{P} \quad (4)$$

式中  $\bar{P}_k$  和  $\bar{P}$  分别指区域平均序列 30 年的标准差和均值。

## 2 蒸发量变化的时空特征

### 2.1 时间特征

黄淮海流域区域年平均蒸发量为 1699.5 mm。其中，冬季(12~2月)为 155.6 mm，约占全年的 9%；春季(3~5月)为 563.7 mm，约占全年的 33%；夏季(6~8月)为 640.7 mm，约占全年的 38%；秋季(9~11月)为 342.7 mm，约占全年的 20%。这说明春夏两季蒸发量是一年中最多的，占全年总蒸发量的 71%。图 2、图 3 分别给出了黄淮海流域四季和年区域平均蒸发量和累计距平的变化。

**冬季** 如图 2(a) 所示，在 20 世纪 60、70 年代蒸发量较大，其 10 年滑动平均值均在 1971 - 2000 年 30 年均值以上。1982 年为转折年(图 3(a))，蒸发量距平转为负值，1989 年达到历史最小值，到 20 世纪 90 年代略有回升。冬季蒸发量年际变率较大，气候变化趋势不明显，1956 - 2000 年气候变化速率为  $-3.0 \text{ mm}/10\text{a}$ ，没有通过信度为 0.01 的显著性检验。

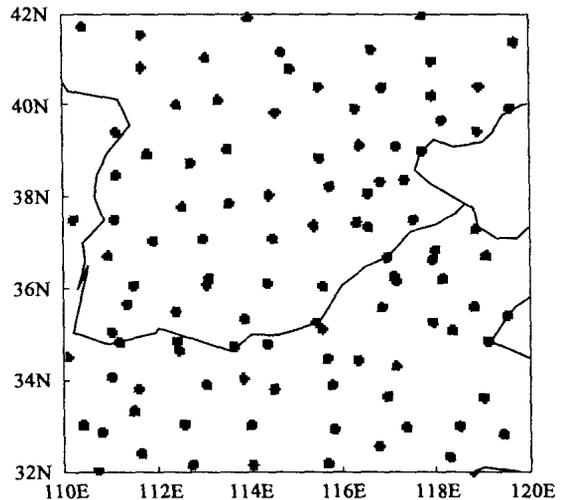


图 1 黄淮海流域站分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Huang-Huai-Hai watershed

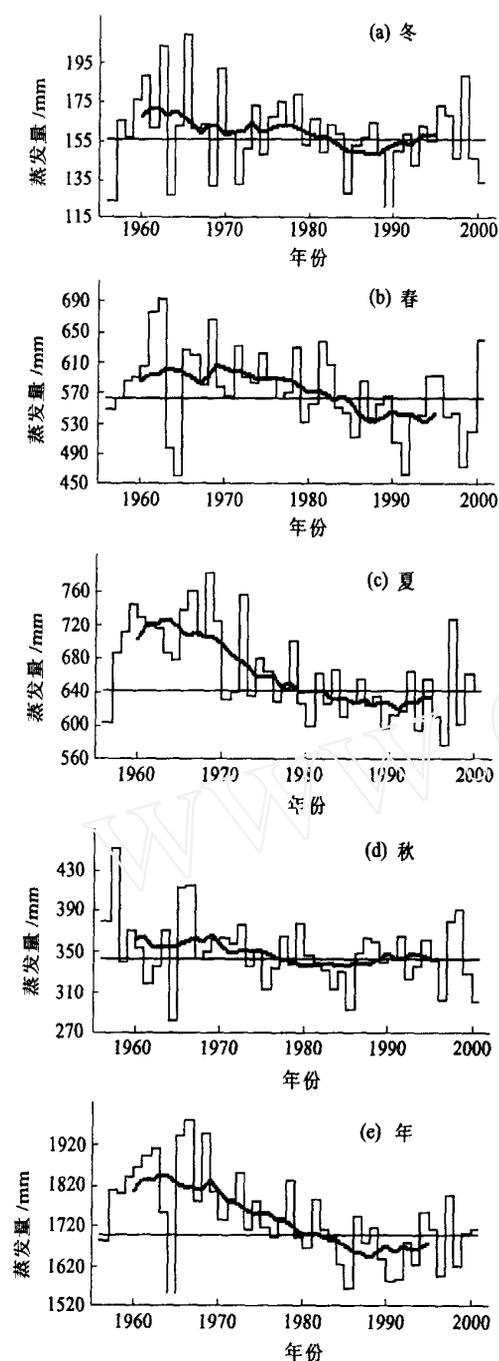


图2 1956 - 2000年黄淮海流域四季及年区域平均蒸发量

Fig. 2 Seasonal and annual region-averaged par-evaporation over Huang-Huai-Hai watershed during 1956 - 2000

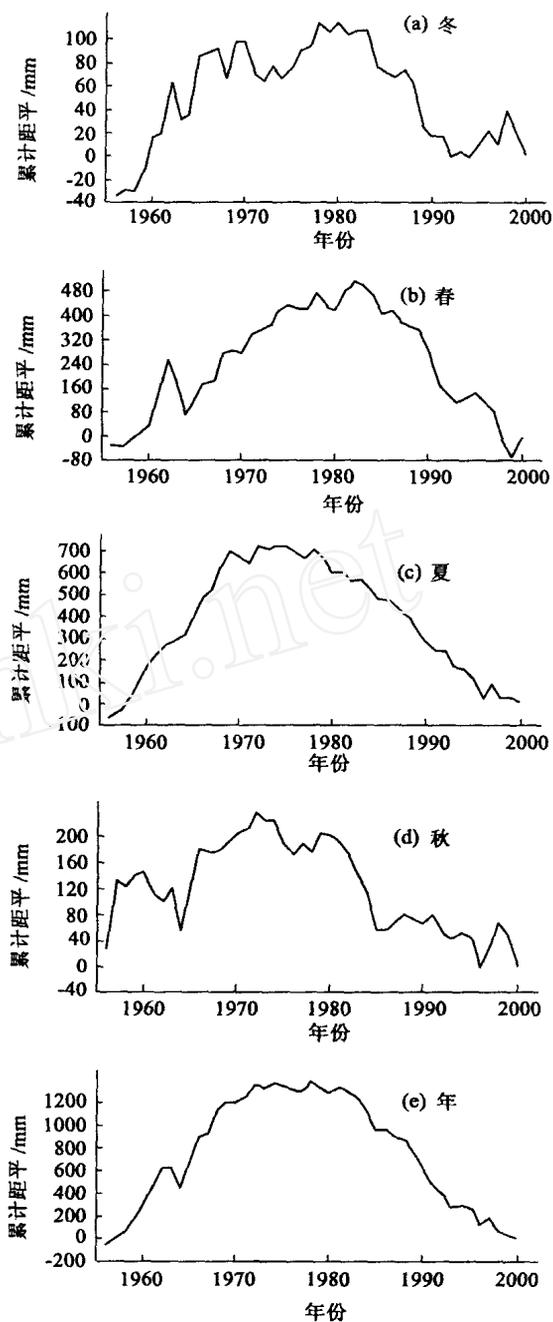


图3 1956 - 2000年黄淮海流域四季及年区域平均蒸发量累计距平

Fig. 3 Seasonal and annual accumulated anomaly or region-averaged par-evaporation over Huang-Huai-Hai watershed during 1956 - 2000

春季 如图2(b)所示,在20世纪60、70年代蒸发量变化不大,基本上以偏多为主,80年代初开始减少,转

折年大约在 1982 年(图 3(b)), 此后基本上是以偏少为主。1956 - 2000 年蒸发量变化速率为  $-14.4 \text{ mm}/10\text{a}$ , 通过了信度为 0.01 的显著性检验, 即存在明显的下降趋势。

**夏季** 图 2(c) 表明, 在 20 世纪 60 年代蒸发量明显偏大, 从 60 年代末开始蒸发量迅速减少, 70 年代比 60 年代约减少了 10%, 但仍处于均值以上。70 年代末下降到均值以下, 转折年大约是 1979 年(图 3(c))。80 年代以后变化幅度不大, 在均值以下振荡, 90 年代末蒸发量略有回升。夏季蒸发量的变化趋势较为显著, 1956 - 2000 年蒸发量变化速率为  $-22.7 \text{ mm}/10\text{a}$ , 通过了信度为 0.01 的显著性检验。

**秋季** 秋季蒸发量没有明显的年际变化(图 2(d)), 趋势变化特征和转折点也不明显(图 3(d))。

年蒸发量与夏季蒸发量的变化基本一致, 20 世纪 60 年代年蒸发量显著偏大, 从 60 年代末开始迅速下降, 至 80 年代初降到均值以下(图 2(e))。1981 年为由多到少的转折年, 80、90 年代基本上以偏少为主。黄淮海流域区域年平均蒸发量的变化趋势较为显著, 1956 - 2000 年气候变化速率为  $-44.7 \text{ mm}/10\text{a}$ , 通过了信度为 0.01 的显著性检验。

综上所述, 黄淮海流域区域平均蒸发量的年际变化特征主要是: 四季和年的区域平均蒸发量变化特征基本一致, 由 20 世纪 60、70 年代偏多转为 80、90 年代偏少, 转折年在 70 年代末 80 年代初。春、夏季蒸发量存在显著的减少趋势, 黄淮海流域区域年平均蒸发量的变化主要是由春夏季蒸发量变化所决定的。

## 2.2 空间特征

虽然黄淮海流域区域平均蒸发量呈下降趋势, 但各站与整个流域的气候变化趋势并不完全一致。图 4 给出了黄淮海流域年蒸发量变化速率等值线分布。从全流域来看, 仅有少数几个站显示为增加趋势, 主要集中在海河流域的西北部(图 4), 但变化速率较小。其他地区均以显著减少为主, 蒸发量减少速率最大的区域集中在海河流域东南部、黄河下游以及淮河流域西部, 减少速率均在  $60 \text{ mm}/10\text{a}$  以上, 最大地点达到  $112 \text{ mm}/10\text{a}$ 。

四季蒸发量的空间分布变化趋势与图 4 相似, 只是变化速率的量值略有不同(图略)。春夏季多数地区表现为显著减少趋势, 其中夏季减少速率最大的区域在淮河流域, 而春季则出现在海河流域的东南部和黄河下游。冬季和秋季减少幅度较小。

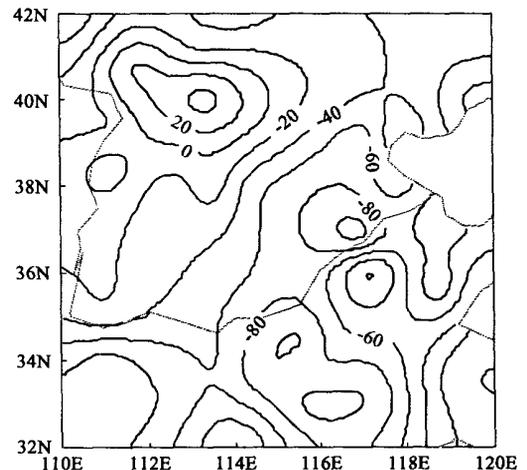


图 4 1956 - 2000 年黄淮海流域年蒸发量变化速率的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of annual pan evaporation trend over Huang-Huai-Hai watershed during 1956 - 2000

## 3 蒸发量变化的气候因子

蒸发量是一个敏感性很强的气候要素, 它不仅受风速、相对湿度、降水量等因子的影响, 还会受到日照(或辐射)和气温的影响。蒸发皿的蒸发量与陆面蒸发有联系, 也有区别。有人认为, 蒸发皿蒸发量减少是陆面蒸发量增加的一个反映, 因为陆面蒸发加大了蒸发皿周围的空气湿度, 导致了蒸发皿蒸发量的减少, 因而蒸发皿蒸发量的减少说明陆面蒸发量增加了<sup>[8]</sup>。但实际上, 影响蒸发皿蒸发的因子绝不是这么简单。

本文的计算表明, 黄淮海流域区域 1956 - 2000 年年平均风速在以  $0.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/10\text{a}$  的速率减少, 通过了 0.01 的信度检验。冬春平均风速的变化速率为  $-0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/10\text{a}$ , 夏秋为  $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/10\text{a}$ , 均通过了信度为 0.01 的显著性检验。而区域平均的相对湿度和降水量在 1956 - 2000 年期间均略有下降, 但变化趋势不明显。区域平均年日照时数在 1956 - 2000 年期间同样呈显著减少趋势, 变化速率为  $-57.1 \text{ h}/10\text{a}$ 。从季节来看, 夏季日照时数减少最大, 为  $-22.7 \text{ h}/10\text{a}$ ; 春季最小, 为  $-8.2 \text{ h}/10\text{a}$ ; 冬、秋季约为  $-13 \text{ h}/10\text{a}$ 。以上变化均通过了信度为 0.01 的显著性检验。由于风速和日照均为影响蒸发的重要因子, 它们的明显减少就在很大程度上从气

候因子角度诠释了本区蒸发皿蒸发量下降趋势的原因；而降水量和相对湿度呈下降趋势，说明它们对蒸发皿蒸发的作用是正的而不是负的，无法解释观测到的蒸发变化趋势，也说明本地区陆面蒸发并不像文献[8]推测的那样显著地影响了蒸发皿蒸发量的变化。

黄淮海流域 1956 - 2000 年年平均气温呈显著上升趋势，增加速率为  $0.2 / 10a$  (通过了信度为 0.01 的显著性检验)，与文献[9]的估算结果一致。春秋两季也以  $0.2 / 10a$  的速率增温，冬季的增温速率高达  $0.4 / 10a$ ，而夏季平均气温没有明显变化。显然，气温变化也不是蒸发减少的主要因子。春夏季平均气温虽然升高没有冬季显著，但也是增暖的，这应该有利于水面蒸发作用加强而不是减弱。

为了进一步分析影响蒸发量的主要气候因子，将黄淮海流域蒸发量与各个气象要素做了散点图(图 5)，并进行了相关普查(表 1)。由图 5 可见，区域年蒸发量与日照时数(图 5(a))、平均风速(图 5(c))、相对湿度(图 5(e))以及气温日较差(图 5(h))具有较好的线性关系。蒸发量与相对湿度呈显著负相关，与日照时数、风速、平均最高气温、平均日较差等呈显著正相关。水分蒸发过程通常受到能量供给条件、水汽输送条件与蒸发

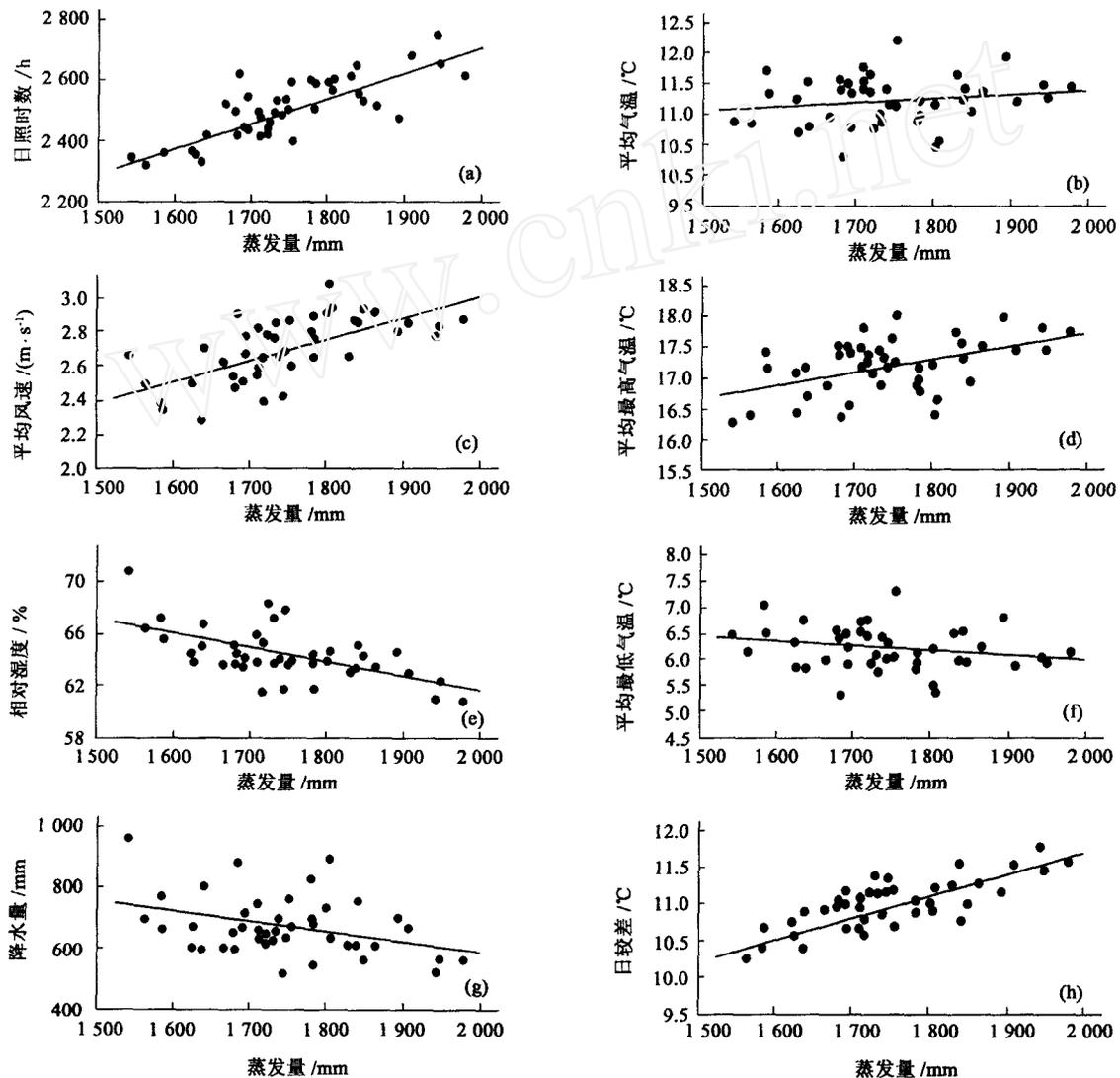


图 5 黄淮海流域年区域平均蒸发量与各气象要素的散点图

Fig. 5 Relationship between annual region-averaged pan evaporation and meteorological elements over the Huang-Huai-Hai watershed

介质的供水能力等三方面物理因素的影响。能量供给条件主要源于太阳辐射，水汽输送条件取决于风速的大小，而蒸发皿的蒸发量经折算以后代表理想的水体的蒸发量。从表1可看出，蒸发量与日照时数有密切的相关关系，相关系数达0.8以上，说明太阳辐射的影响是非常重要的。与平均风速也呈现显著相关，相关系数为0.65。同时蒸发量与气温平均日较差也具有很高的相关程度，相关系数高达0.83以上，春季可达0.93。可见，平均日较差在蒸发量减少趋势中可能也起着重要作用，这与 Peterson 等<sup>[4]</sup>的发现是一致的。一般情况下，在1d中，对蒸发作用影响大的是日间的最高温度，日较差常常和日最高气温变化相联系。因此，日较差同蒸发之间的高度相关似乎是可以理解的。

表1 黄淮海流域蒸发量与各要素相关系数

Table 1 Correlation coefficient between pan evaporation and meteorological elements over Huang Hai He watershed

时期	日照时数	平均风速	相对湿度	平均气温/ /	平均最高气温 /	平均最低气温 /	平均日较差	降水量
冬季	0.72	0.46	-0.82	0.30	0.60	0.02	0.88	-0.64
春季	0.89	0.58	-0.81	0.24	0.58	-0.28	0.93	-0.67
夏季	0.83	0.62	-0.82	0.50	0.71	0.10	0.84	-0.28
秋季	0.83	0.47	-0.82	-0.13	0.51	-0.28	0.89	-0.67
年	0.81	0.65	-0.58	0.02	0.31	-0.29	0.83	-0.33

在全球平均气温上升的同时，气温日较差在全球大部分地区呈现下降趋势<sup>[10]</sup>。我国大部分地区的气温日较差也已明显下降<sup>[11]</sup>。黄淮海流域的年平均气温在过去45年里上升了0.9℃。而年平均气温日较差在1956-2000年下降了0.54℃，这主要是因为年平均最高气温的升温速率(0.14℃/10a)比最低气温的升温速率(0.26℃/10a)小，导致了气温日较差的下降。春季的平均气温日较差的变化速率为-0.13℃/10a，夏季为-0.11℃/10a。也就是说气温的上升主要是在夜间，而白天的升温并不显著，这也可能是造成蒸发量与平均气温以及最低气温相关不密切的原因。虽然与最高气温呈显著相关，但平均最高气温在蒸发力较大的春季变化速率为0.13℃/10a，而夏季呈现微弱的降温趋势，变化速率为-0.004℃/10a(均未通过信度为0.01的显著性检验)。

Peterson 等<sup>[4]</sup>认为，日较差的下降主要是因为人类活动排放的温室气体以及气溶胶增加，导致太阳辐射的减少。黄淮海流域的日照时数的显著下降趋势，特别是夏季日照时数的显著减少，也可能和气溶胶含量增加有关，但这还需要进一步研究证实。

## 4 结 论

本文利用1956-2000年小型蒸发皿观测资料，分析了黄淮海流域蒸发量的变化趋势及其可能的气候影响因素，结果表明：

(1) 黄淮海流域区域平均蒸发量的变化非常明显，其四季和年的区域平均蒸发量变化特征基本一致，由20世纪60、70年代偏多转为80、90年代偏少，转折时间在70年代末、80年代初。春、夏季蒸发量存在显著的减少趋势，区域平均的年蒸发量变化主要是由春、夏季蒸发量变化所决定的。

(2) 四季和年蒸发量变化趋势的空间分布基本相似，但变化速率略有不同。春季减少最大区域主要在海河流域的东南部和黄河下游，而夏季减少最多区域却在淮河流域。

(3) 虽然蒸发量与平均风速、相对湿度及降水量呈显著相关，但相对湿度和降水量的变化趋势并不显著，一般呈微弱下降，因此平均风速可能是影响蒸发量的主要气候因子之一。

(4) 蒸发量与日照时数、气温日较差具有很高的相关关系，而与平均气温、平均最低气温相关不密切。这主要是由于增温主要出现在冬季及夜间，而在蒸发力较高的春、夏季及白天气温变化不明显，甚至出现下降。因此，日照时间或太阳辐射是影响蒸发量变化的另一主要因子。气温日较差似乎也通过某种环节对长期的蒸发量变化造成重要影响。

本文仅对蒸发皿蒸发量减少的原因做了初步的分析，具体的物理成因有待进一步深入研究。

#### 参考文献：

- [1] 刘颖秋. 黄淮海流域水危机与水资源可持续利用[J]. 科技导报, 2002, (7):51 - 54.
- [2] Houghton J, Ding Y. Climate Change: Scientific Basis[R]. IPCC TAR Working Group 1, Cambridge University Press, 2001.
- [3] Menne MJ, Peterson T C, Malone R W. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28:2665 - 2668.
- [4] Peterson T C, Golubev V S, Grolsman P. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377:687 - 688.
- [5] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating? [J] Science, 2002, 298:1345 - 1346
- [6] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298:1410 - 1411.
- [7] Jones P D, Hulme M. Calculating Regional Climatic Time Series for Temperature and Precipitation: Methods and Illustrations[J]. International Journal of Climatology, 1996, 16:361 - 377.
- [8] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox[J]. Nature, 1998, 396:30.
- [9] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994, (12):19 - 26.
- [10] Easterling David R, Briong Horton, Philip D Jones, *et al.* Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe[J]. Science, 1997, 277:364 - 367.
- [11] 翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低温度变化[J]. 气象学报, 1997, 55(4):418 - 429.

## Recent change of pan evaporation and possible climate factors over the Huang-Huai-Hai watershed, China

GUO Jun<sup>1</sup>, REN Guo-yu<sup>2</sup>

(1. Tianjin Climate Service Center, Tianjin 300074, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

**Abstract :** The tendency and the possible causes of the pan evaporation change over the Huang-Huai-Hai watershed from 1956 to 2000 are analyzed by using the observed monthly data. The results show a significant decrease in the pan evaporation in the area. The rate of decrease is about - 50 mm/10a, and the maximum rate of decrease reaches - 80mm/10a over the plain area. It is also found that the maximum decrease of the pan evaporation occurred in the southeast of the Haihe basin and the lower Yellow River during spring, and in the Huaihe basin during summer. The main climatic factors for the change of the pan evaporation are analyzed by studying the relationship between the pan evaporation and such elements as the sunshine duration, the average wind speed, the diurnal temperature range (DTR), the mean maximum and minimum temperature, the mean temperature and the precipitation. It is thus obvious that the decrease of the pan evaporation was mainly caused by the weakening solar radiation and the sunshine duration. The average wind speed and the DTR may also play an important role in an unknown mechanism.

**Key words :** pan evaporation; climate change; Huang-Huai-Hai watershed; variation characteristics