

# 河北省近40年蒸发皿蒸发量变化特征及影响因素初探

刘学锋<sup>1</sup>, 于长文<sup>1</sup>, 任国玉<sup>2</sup>

(1 河北省气候中心, 石家庄 050021; 2 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081)

**摘要:** 利用河北省区域1963-2003年50个站蒸发皿蒸发量资料, 分析了蒸发量变化及影响因素。结果表明: 近40年来河北省区域平均年和四季蒸发量变化, 由60、70年代偏多转为80、90年代偏少, 转折年均均在70年代末和80年代初。春、夏季蒸发量减少趋势明显, 分别为-31.3、-27.4 mm/10 a, 年蒸发量的减少主要是由春、夏季减少所致; 对蒸发量的空间分析表明, 区域内94%的站点呈减少趋势, 70%站点减少趋势显著, 减少速率最大区域在冀中南部东部区域, 减少速率在-100 mm/10 a以上; 蒸发量变化与各要素相关分析表明, 蒸发量变化与日照时数、低云量、气温日较差相关显著, 而日照时数、低云量、气温日较差与太阳辐射大小关系密切, 因此, 太阳辐射是影响蒸发量变化的主要因素, 同时平均风速的减少对蒸发量的减少也起着重要作用。

**关键词:** 蒸发量 变化特征 影响因素 河北省

**中图分类号:** P426.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6060(2007)04-0507-06(507~512)

水作为地球生命的载体, 是人类生存和发展的命脉, 其盈亏丰欠、品质优劣等对社会经济的可持续发展具有很大制约作用, 气候变化使全球水资源供给条件发生变化, 进而影响到生态环境和社会经济的发展。气候变化特别是气温和降水的变化对水资源的影响有了大量的研究<sup>[1]</sup>, 但就水资源平衡关系而言, 其它气候要素对水资源的变化也具有重要影响。蒸发就是水量平衡的重要组成部分, 是水循环中最直接受土地利用和气候变化影响的一项; 同时蒸发(散)又可减小辐射向感热的转化, 增加空气湿度, 提高最低气温及降低最高气温, 起到调节气候的作用。河北省环绕京津地区, 海河、滦河水系流经此区域入海, 在社会经济发展中占有重要的战略地位, 因此进行此区域蒸发变化的研究, 对深入了解气候变化规律及原因, 进一步探讨气候变化对水平衡和水循环要素的影响具有重要的意义。

按照一般规律, 全球平均气温升高时, 空气将变得更加干燥, 陆面水体蒸发也会增加。然而, 尽管北半球近50年来平均气温以0.15℃/10 a的速率增温<sup>[1]</sup>, 但是Menne等人<sup>[2]</sup>(2001)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。国内外有很多科学家从不同的角度探讨了蒸发量减少的原因<sup>[3-8]</sup>, 他们认为太阳辐射的减少是主要原因。

笔者在研究过程中采用20 cm直径小型蒸发皿观测的蒸发量, 蒸发皿观测的资料虽然不能代表水面蒸发, 但与水面蒸发之间存在较好的相关关系, 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, 但在干旱气候或干旱季节、干旱天气下, 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。但蒸发皿观测的蒸发量是气象台站常规观测项目之一, 其观测资料累积序列长、可比性好, 长期以来, 一直是水资源评价、水文研究、水利工程设计和气候区划的重要参考指标。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料来源

本文选用河北省区域内50个气象站1963年至2003年气象资料。资料中的蒸发皿蒸发量、风速、日照时数、相对湿度、平均气温、平均最高气温、平均

收稿日期: 2006-10-25; 修订日期: 2007-04-05

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目课题“全球与中国气候变化的检测和预测(2001BA611B-01)”资助和河北省科学技术研究与发展计划项目课题“河北省近50年气候变化及其影响研究(05820601D)”资助

作者简介: 刘学锋(1963-), 男, 河北省唐山人, 高级工程师, 从事气候变化、沙尘天气研究

最低气温、日较差、低云量等资料均为月值,本文中  
所用的蒸发量如无特殊说明均指蒸发皿蒸发量。在  
50个站中,有个别站点个别年份的资料缺测,在使  
用前进行了插补订正。因此选用各站资料,均具有  
完整41年序列。

1.2 计算方法

1.2.1 气候变化速率 为定量分析河北省蒸发量  
的变化趋势,采用最小二乘法计算了年及四季蒸发  
量的气候变化速率<sup>[9]</sup>。即计算样本与时间的线性  
回归系数:

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

式中: $y_i$  为各要素时间序列, $t_i$  为时间( $t_i = 1, 2, \dots$ ), $n = 41$ 。称  $10 \times \alpha$  为气候变化速率,单位为各  
要素单位/10 a。如果为蒸发量,则单位为(mm/  
10 a)。

对50个站分别按年和四季计算各要素的气候  
变化速率,季节划分是以3~5月为春季、6~8月为  
夏季、9~11月为秋季、12月至翌年2月为冬季。

1.2.2 相关系数 在对影响蒸发量各要素进行相  
关普查时,分别计算了蒸发量与各要素序列之间年

及四季的相关系数,作为相关程度大小的表征指标,  
此种指标基本反映了两者之间的关联密切程度。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}}, \quad (2)$$

式中: $r_{ij}$ 为两个要素序列之间的相关系数, $n$ 为样本  
数, $x_{ik}(x_{jk})$ 分别表示第*i*(*j*)个要素第*k*年的序列值。

2 河北省蒸发量变化的时空分布特征

2.1 蒸发量的变化特征

河北省区域平均年蒸发量为1801.3 mm。冬  
季(12~2月)为154.3 mm,约占全年8.6%;春季  
(3~5月)为628.4 mm,约占全年34.9%;夏季(6  
~8月)为665.1 mm,约占全年的36.9%;秋季(9~  
11月)为353.6 mm,约占全年的19.6%。说明春、  
夏两季蒸发的多少对水循环起着重要的作用。

图1、图2分别给出河北省年和四季区域平均  
蒸发量和累计距平的变化。由图可见,河北省区域  
平均历年蒸发量总体呈下降趋势,其气候变化速率  
为-85.5 mm/10 a,通过了0.01信度检验。从变化  
过程分析,20世纪60、70年代蒸发量较多,其5年

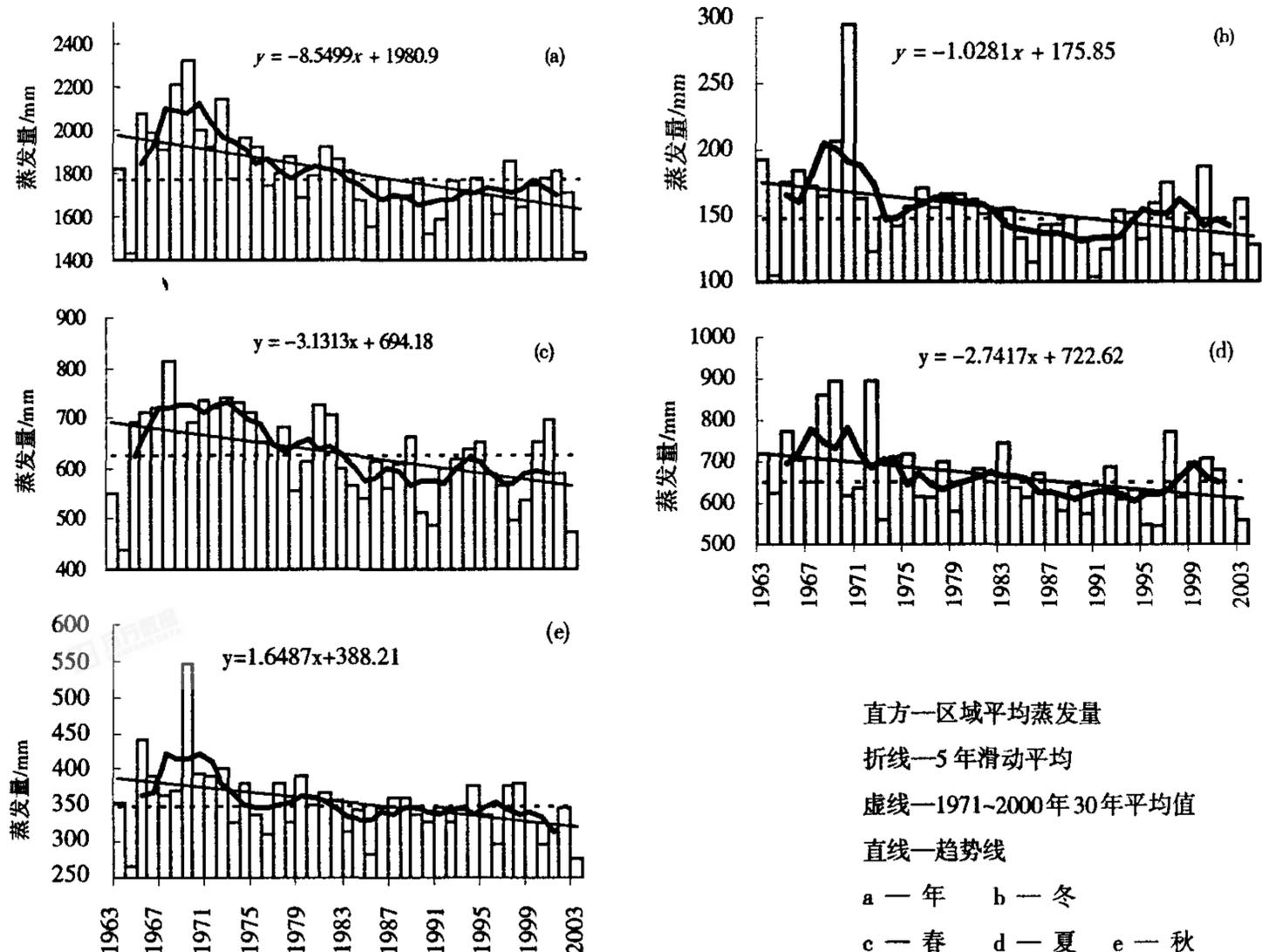


图1 1963-2003年河北省年及不同季节区域平均蒸发量特征变化

Fig. 1 Variation of mean seasonal and annual evaporation in Hebei during 1963-2003

滑动平均值均在 1971 - 2000 年 30 年均值以上(图 1a)。1969 年达到 40 年来最高值 2 319.7 mm,自此

之后迅速下降,80 年代初降到均值,1983 年为转折年(图 2a),其后在均值以下呈现波动式减小。

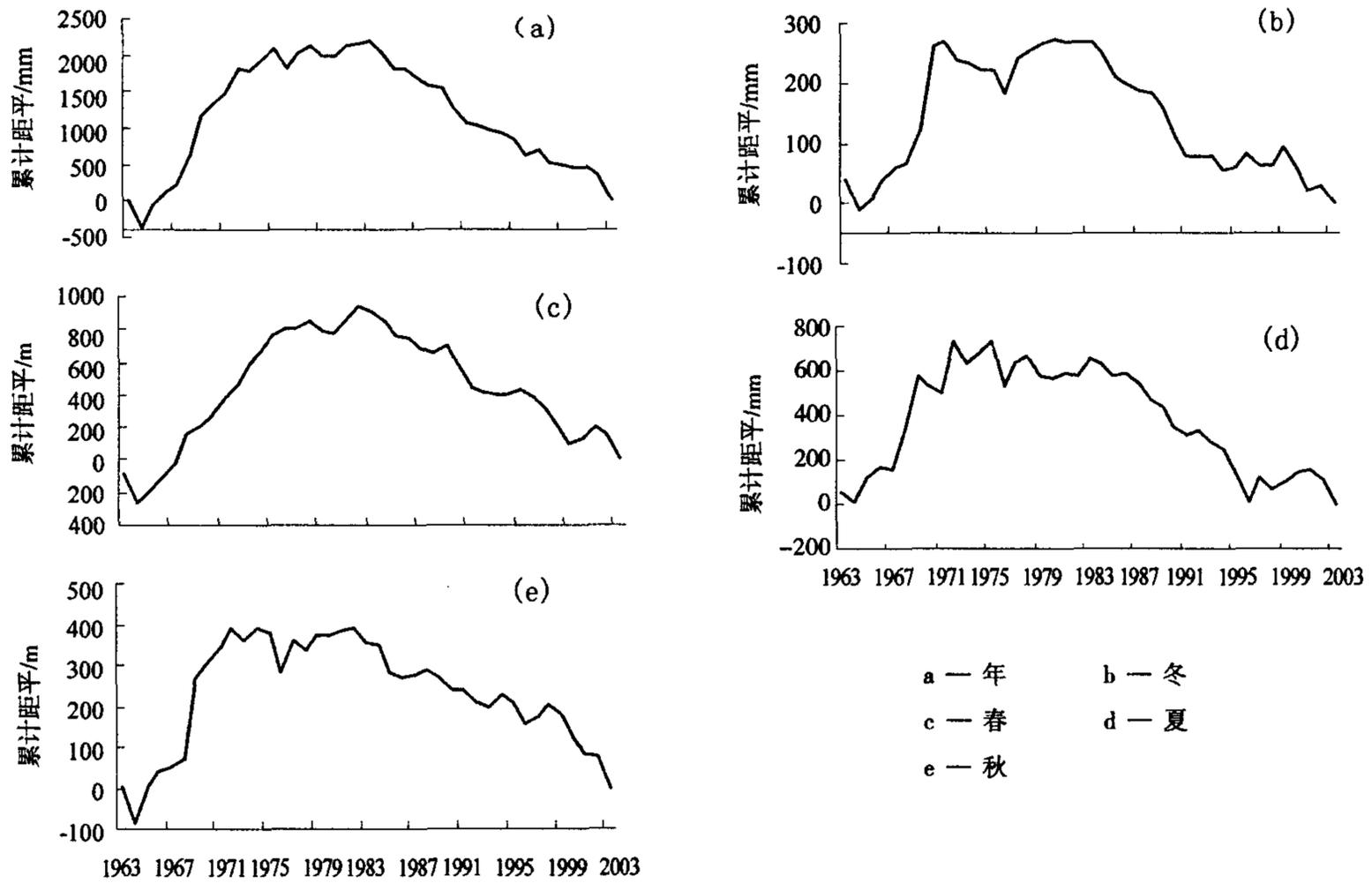


图 2 1963 - 2003 河北省年及不同季节区域平均蒸发量累计距平

Fig 2 Accumulated anomaly of averaged seasonal and annual evaporation in Hebei

就各季蒸发量变化而言,季蒸发量变化态势与年变化态势基本一致,均呈现下降趋势。其表现都是 20 世纪 60、70 年代蒸发量居多,80、90 年代偏少,转折年份都出现在 70 年代末或 80 年代初(详见图 1、图 2)。但各季变化速率差别较大,春、夏、秋、冬季变化速率分别为 -31.3、-27.4、-16.5、-10.3 mm/10 a,其中春、夏、秋三季通过了 0.01 的信度检验。由此看出,春、夏、秋季蒸发量存在显著减少趋势,20 世纪 70 年代以来年蒸发量减小主要是由于春、夏两季蒸发量减小所致,冬季影响相对较弱。

2.2 蒸发量变化趋势空间分布

虽然河北省区域平均蒸发量总体呈下降趋势,但各站与整个区域气候变化趋势并不完全一致。图 3 给出区域各站年蒸发量气候变化速率。全省仅有个别站点为增加趋势,绝大部分区域都为减少趋势。蒸发量减少速率最大区域主要集中在省中南部地区东部,变化速率在 -100 mm/10 a 以上,故城最大为 -185.3 mm/10 a;河北省北部冀北高原、冀东平原东部、太行山区中北段以及河北省中部大部分地区的气候变化速率均在 -60 mm/10 a 以上。在分析

中发现,47 个站(94%)变化速率呈现减少趋势,其中 35 个站(70%)通过 0.05 信度检验。四季气候变化速率空间分布形式基本与图 3 类似(图略),只是变化速率不同。

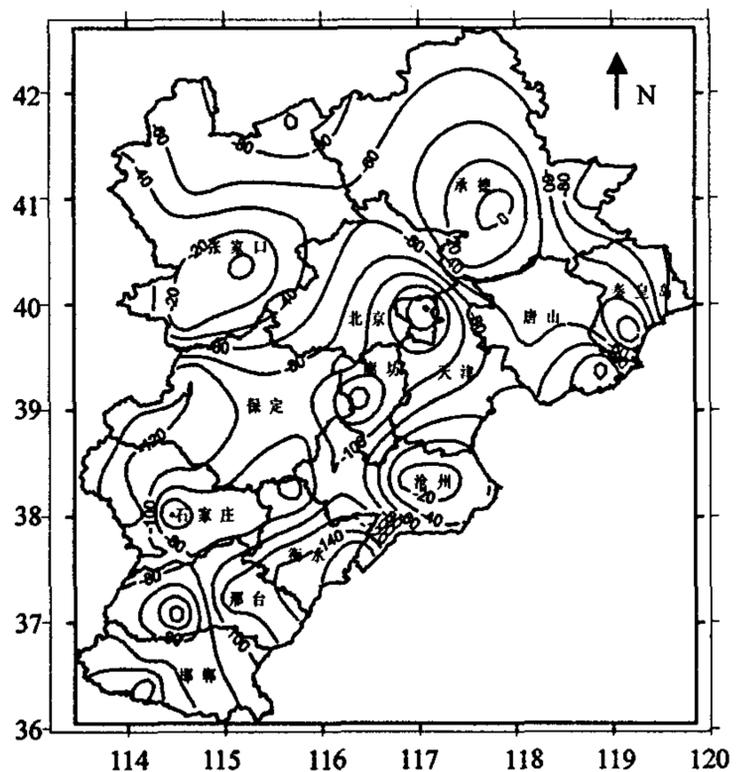


图 3 河北省区域年蒸发量气候变化速率空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of area and year evaporation climate change rate in Hebei during 1963 - 2003

### 3 河北省区域蒸发量变化影响因素分析

蒸发量是敏感性很强的气象要素,其变化受多种因子影响。目前,国际上研究认为,蒸发皿蒸发量下降主要是由太阳辐射下降引起<sup>[3,10,11]</sup>。Stanhill 和 Cohen 认为云量和气溶胶增加是近年来全球太阳辐射下降主要原因<sup>[12]</sup>。Roderick 从全球气温日较差变小事实出发,在理论上解释了近年来蒸发皿蒸发量下降主要是由于太阳辐射量减少造成<sup>[5]</sup>。另外,根据改进后的彭曼公式,反映出影响蒸发量的主要气候因子不仅受局地气象要素如风速、相对湿度等的影响,还会受到大尺度气候要素如日照、气温等的影响。而日照时数、云量与当地接受的太阳辐射大小有密切关系。因此,依次分析了平均风速、日照时数、低云量、相对湿度、平均气温、平均最高气温、平均最低气温、气温日较差等八种气象因子的趋势变化及与蒸发量的相关程度。

#### 3.1 各气象要素变化特征

河北省区域平均风速 1963 - 2003 年期间以  $-0.28 \text{ m/s}/10 \text{ a}$  速率减少,冬、春、夏、秋四季分别为  $-0.35$ 、 $-0.33$ 、 $-0.20$ 、 $-0.24 \text{ m/s}/10 \text{ a}$ ,冬春季减少速率较大,夏秋季较小,均通过 0.01 信度检验;相对湿度 1963 - 2003 年期间略有上升,低云量略有下降,但变化趋势都不明显,均没有通过 0.01 信度检验。

河北省区域平均日照时数近 40 年呈显著减少趋势,其变化速率为  $-89.7 \text{ h}/10 \text{ a}$ 。以夏季减少速率最大,为  $-29.6 \text{ h}/10 \text{ a}$ ;春季最小为  $-14.2 \text{ h}/10 \text{ a}$ ;冬秋季分别为  $-21.3$ 、 $-25.0 \text{ h}/10 \text{ a}$ ,均通过 0.01 信度检验。

河北省区域平均气温 1963 - 2003 年期间呈显著增温趋势,年变化速率为  $0.32 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ;冬、春两季分别为  $0.67$ 、 $0.34 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,均通过 0.01 信度检验。夏、秋两季在  $0.15 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$  以下,没有通过信度检验,减少趋势不明显。平均最高气温、平均最低气温、气温日较差年变化速率分别为  $0.23$ 、 $0.47$ 、 $-0.03 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,通过 0.01 信度检验。平均最低气温增温率比平均最高气温明显,导致气温日较差变化速率呈递减趋势。这说明气温上升主要是在夜间。

#### 3.2 蒸发量与各要素相互关系分析

为进一步分析影响蒸发量变化的主要因素,将

河北省区域蒸发量与各要素进行相关普查,发现蒸发量与日照时数、平均风速、气温日较差呈显著正相关;与云量(除冬季外)呈显著负相关;蒸发量与平均最高气温在春、夏季呈显著正相关,年和秋冬季呈一般正相关;与四季平均最低气温呈一般负相关,与年值呈显著负相关;与平均气温、相对湿度正负相关程度不确定。

Easterling 等人(1997)<sup>[13]</sup>发现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却呈现下降趋势。在我国大部分地区的气温日较差也是下降的趋势<sup>[11]</sup>。Peterson 等人(1995)<sup>[3]</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,Roderick 从全球气温日较差变小事实出发,在理论上解释了近年来蒸发皿蒸发量下降主要是由于太阳辐射量减少造成<sup>[5]</sup>。因此,从一定意义讲,气温日较差下降与太阳辐射减少具有一定相关关系;另外,日照时数大小变化通常可以较好反映太阳总辐射大小变化;低云量对太阳辐射具有遮挡作用。在前面分析中,日较差、日照时数、低云量呈现减少趋势,因此,综合上述分析,太阳辐射减少是致使蒸发量减少的主要原因。

影响蒸发量变化的气象要素中,平均风速与蒸发量相关系数达 0.72,各季节的相关系数均在 0.55 以上,春夏季的相关系数分别为 0.66 和 0.65,均通过了 0.01 的信度检验,说明平均风速对蒸发减少具有重要作用;蒸发量与平均气温、平均最高气温、平均最低气温相关程度在多数季节相关不明显。分析原因,可能是因为虽然平均气温呈现增温趋势,但冬季增温速率最大,而蒸发量在冬季最小,春、夏季节较大,表现为时间上不同步,这使得蒸发在相关季节内蒸发量增加趋势并不明显。另外白昼增温相对较小,夜间增温相对较大,而蒸发在白天由于太阳辐射等影响蒸发力较大,而夜间较小,从而导致相关不明显,其具体机理有待于进一步探讨。从表 1 中可看出相对湿度对蒸发量的影响也不明显。

具体各站蒸发量变化与各要素相关程度与整个区域平均相关程度并不完全一致。由图 4a 可知,该区域内 86% 的站点蒸发量与日照时数相关系数通过 0.01 信度检验,相关程度在显著水平之上,区域北部的桑洋盆地、承德市以及河北省中南部共计 14% 的站点相关程度在显著水平之下;从各站蒸发量与平均风速相关程度看(图 4b),其分布形式与日

照基本类似,全省 74% 站点相关程度显著,26% 站点相关程度不显著;各站蒸发量与日较差的相关系数 70% 站点通过了 0.01 信度的显著水平检验(图略);对于云量与蒸发量的相关性,全省有一半左右的站点相关程度显著(图略)。因此,从全省区域空

间分布蒸发量与有关要素相关显著程度站点数量来看,密切程度较好的依次为日照时数、平均风速、气温日较差、平均低云量。同时,从另外一个方面说明蒸发量的变化因地制宜,其影响因素较多,物理机制也比较复杂。

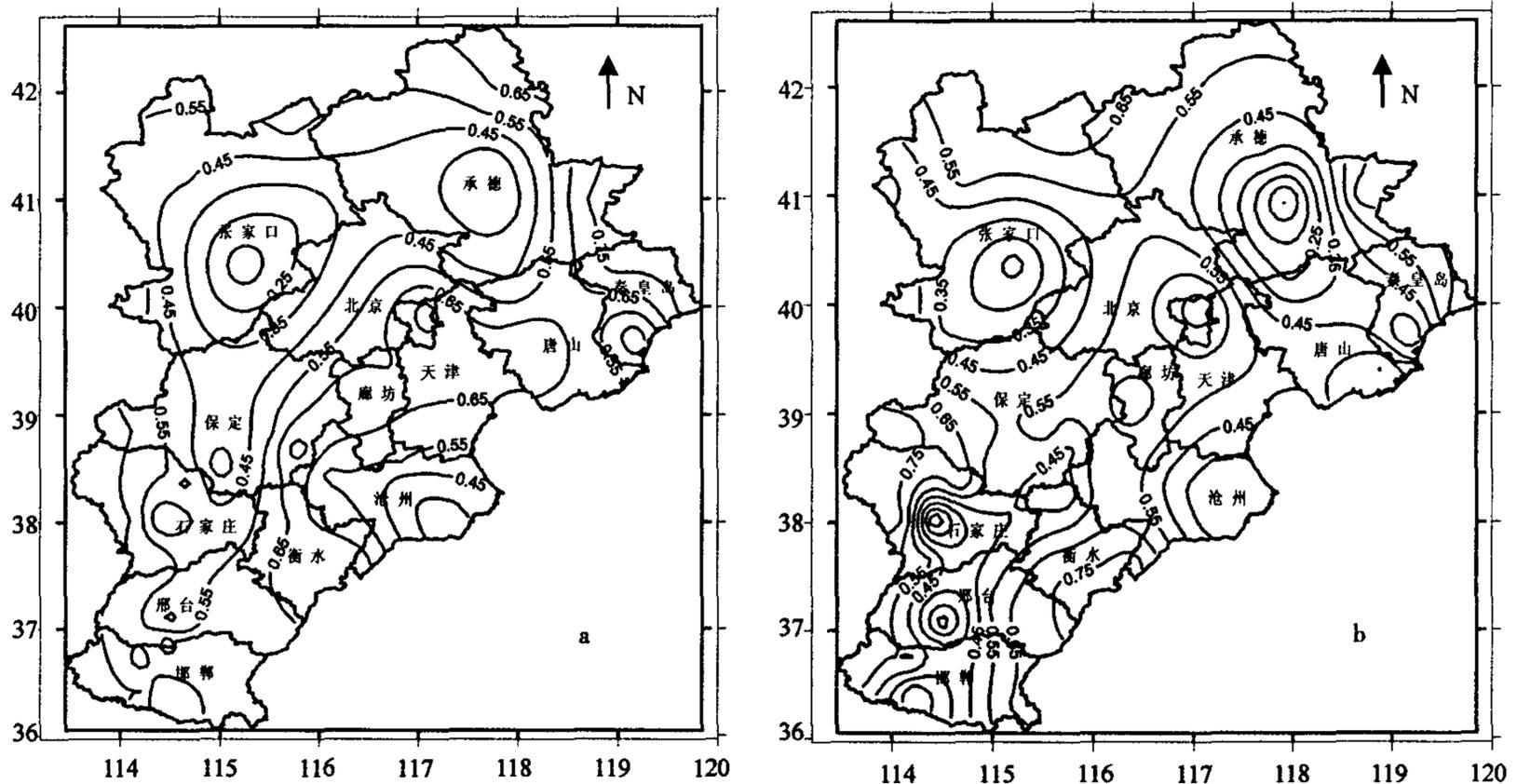


图 4 年蒸发量与日照时数、平均风速相关系数空间分布

Fig 4 Spatial distribution for coefficient correlation between pan evaporation and sunshine duration, and wind speed

表 1 蒸发量与各要素之间相关系数

Tab.1 Correlation coefficient between pan evaporation and each element

	春	夏	秋	冬	年
风速	0.6658 **	0.6458 **	0.5722 **	0.5548 **	0.7173 **
日照时数	0.8546 **	0.7925 **	0.7168 **	0.5515 **	0.7776 **
相对湿度	0.0054	-0.0315	-0.2072	-0.2524	-0.1245
低云量	-0.7367 **	-0.5798 **	-0.5802 **	-0.3912	-0.4620 **
平均气温	0.2277	0.4318 **	0.0204	-0.0168	-0.2167
平均最高气温	0.4794 **	0.6326 **	0.2760	0.2465	0.1071
平均最低气温	-0.2503	-0.1024	-0.3352	-0.2126	-0.5262 **
气温日较差	0.8783 **	0.8771 **	0.6524 **	0.7241 **	0.7869 **

(\*\*a=0.01 水平下显著)

## 4 结论与讨论

本文利用 1963 - 2003 年近 40 年蒸发皿蒸发量的观测资料,分析了蒸发皿蒸发量的变化趋势,主要结论如下:

(1) 河北省区域年和四季蒸发量变化特征基本一致,其年代际变化由 60、70 年代偏多转为 80、90 年代偏少,转折年均在 70 年代末 80 年代初。春、夏

季蒸发量减少趋势明显,年蒸发量减少主要是由于春、夏两季蒸发量的减小所致。

(2)年和四季的蒸发量变化趋势空间分布态势基本相似,但变化速率不同;各站年蒸发量变化趋势与整个区域变化趋势并不完全同步,区域内 94% 站呈减少趋势,70% 站减少趋势显著,减少速率最大区域主要集中在冀中南部地区东部,变化速率在  $-100 \text{ mm}/10 \text{ a}$  以上,故城最大为  $-185.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。

(3)蒸发量与气温日较差、日照时数成显著正相关,与低云量呈显著负相关,气温日较差、日照时数、低云量与太阳辐射大小关系密切,因此综合分析太阳辐射减少是致使蒸发量减少的主要原因。

(4)影响蒸发量气象要素中,平均风速对蒸发量减少趋势作用明显,相对湿度对蒸发量影响不明显。平均气温、平均最高气温、平均最低气温与蒸发量的相关程度在多数季节相关不明显,其原因可能是由于明显增温趋势主要表现在冬季(平均气温)及夜间(平均最低气温)气温增温上,而在蒸发力较高的春、夏季及白天的增温趋势不明显所致。

(5)各站点蒸发量与有关气象要素相关显著水平,从全省分布区域和站点数量分析,其密切程度顺序依次为日照时数、平均风速、气温日较差、平均低云量。

本文仅对蒸发皿蒸发量的变化特征及影响因素进行了初步分析,由于影响蒸发的因素很多,其物理机制也比较复杂,有待于进一步进行研究。

### 参考文献 (References)

- [1] Houghton J, Ding Y. Climate Change [R]. Scientific Basis. IPCC TAR Working Group 1, Cambridge University Press, 2001.
- [2] Menne M J, Peterson T C, Malone R W. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR [J]. A reassessment. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 2665 - 2668.
- [3] Peterson T C, Golubev V S, Grolsman P Ya, Evaporation losing its strength [J]. *Nature*, 1995, 377: 687 - 688.
- [4] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating? [J]. *Science*, 2002, 298, 1345 - 1346.
- [5] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. *Science*, 2002, 298, 1410 - 1411.
- [6] Qiu Xinfu, Liu Changming, Zeng Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin [J]. *Journal of natural resources*, 2003, 18(4): 440 - 444. [邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 440 - 444.]
- [7] Song Jiangshan, Yang Hui, Zhang Qingyun. The Characteristics of temporal and spatial variation of water resource components over north china [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(4): 552 - 556. [宋正山, 杨辉, 张庆云. 华北地区水资源各分量时空变化特征 [J]. *高原气象*, 1999, 18(4): 552 - 556.]
- [8] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, Variations of precipitation and evaporation in north China in recent 40 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(2): 6 - 11. [杨建平, 丁永建, 陈仁升. 近 40 年来中国北方降水量与蒸发量变化 [J]. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(2): 6 - 11.]
- [9] Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 4 - Phase climate change features in the last 100 years over China [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 1995, 55(4): 431 - 439. [施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近百年来 4 个年代际的气候变化特征 [J]. *气象学报*, 1995, 55(4): 431 - 439.]
- [10] Cohen S, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet-Dagan, Israel, 1964 - 1998 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 83 - 91.
- [11] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20, 381 - 396.
- [12] Stanhill G, Gohen S. Global dimming a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. *Agricultural and forrest Meeorology*, 2001, 107: 255 - 278.
- [13] Easterling David R. Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. *Science* 1997 277: 364 - 367.

## Variation of evaporation capacity and influence factors in Hebei Province between 1963 - 2003

LIU Xue-feng<sup>1</sup>, YU Chang-wen<sup>1</sup>, REN Guo-yu<sup>2</sup>

(1 Hebei Climate Center, Shijiazhuang 050021, Hebei, China;

2 Key Laboratory of Climate Change, Chinese Meteorological Administration, Climate Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The variation of evaporation and its causes are analyzed with the observational data set of pan evaporation from 1963 to 2003 in Hebei Province. The results show that in the latest 40 years the averaged seasonal and annual evaporation of Hebei Province are all above normal in 1960s and 1970s, while below normal in 1980s and 1990s, and the turning points are all between the late 1970s and the early 1980s. The significant decline trend of spring and summer have been detected at the rate of -31.3 mm and -27.4 mm per decade, which is the main cause of the annual evaporation decrease. The spatial analysis indicates that the annual evaporation of 94% stations has decline trend, and 70% has significant decline trend. The eastern part of south central Hebei is characterized by the largest decline rate of annual evaporation (at -100 mm per decade). The correlation analysis between evaporation and other elements shows that evaporation has significant correlation with the conditions of sunshine duration, low cloud and daily temperature range, therefore, solar radiation is the key factor of the variation of evaporation since the three elements mentioned - above are all closely related to it. Meanwhile the decline of wind speed is another key contributor to the decrease of evaporation.

**Key Words:** evaporation; features of variation; contributing factors; Hebei Province