

# 吉林省蒸发量的时空分布特征

杨璐<sup>1</sup>, 张兵兵<sup>1</sup>, 王琪<sup>2</sup>, 王艳萍<sup>3</sup>, 高莉莉<sup>1</sup>, 史奎桥<sup>1</sup>

(1. 锦州市生态与农业气象中心, 辽宁 锦州 121001;

2. 吉林省气象科学研究所, 长春 130062; 3. 吉林省气象信息网络中心, 长春 130062)

**摘要:**利用吉林省 1971—2010 年的 45 个地面气象站逐日气象观测数据,应用累计距平、气候趋势系数、气候倾向率、高桥公式计算并分析吉林省年蒸发皿蒸发量和实际蒸发量的时空分布特征。结果表明:吉林省 1971—2010 年的蒸发皿蒸发量呈显著下降趋势,其中春季蒸发下降速率最大,在夏、秋、冬三季中存在上升的趋势,但不显著。空间上看,全省蒸发皿蒸发量呈东部减少、中部部分减少、西部增加的趋势,但不同季节的影响范围存在一定的变化。吉林省年实际蒸发量占蒸发皿蒸发量的 25%,实际蒸发量随时间呈微上升趋势,但不显著。在影响蒸发皿蒸发量的气象因子中,风速和温度日较差是主要因素。实际蒸发量与降水量和温度日较差之间的相关性显著,其中温度日较差是实际蒸发量的主要影响因素。

**关键词:**气候变化; 蒸发量变化趋势; 高桥公式; 吉林省

**中图分类号:**P412.13

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)01-0197-06

## Spatiotemporal Distribution of Evaporation in Jilin Province

YANG Lu<sup>1</sup>, ZHANG Bingbing<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>, WANG Yanping<sup>3</sup>, GAO Lili<sup>1</sup>, SHI Kuiqiao<sup>1</sup>

(1. Jinzhou Ecology and Agriculture Meteorological Center, Jinzhou, Liaoning 121001, China;

2. Institute of Meteorology Science of Jilin Province, Changchun 130062, China;

3. Meteorological Information Network Center of Jilin Province, Changchun 130062, China)

**Abstract:** Base on the daily meteorological observation data from 1971 to 2010 in Jilin Province, the spatial and temporal distribution characteristics were analyzed in the pan evaporation and actual evaporation by using the accumulated anomaly, climate tendency coefficient, climatic trend rate and Gaoqiao formula methods. The results were as follows. The pan evaporation rate decreased significantly from 1971 to 2010, especially in spring. In the other three seasons, the rate showed a weak increasing tendency. In terms of space, the pan evaporation in Jilin Province was decreasing in the eastern part and parts of the central region and increasing in the western part. However, there were certain changes in different seasons. The actual evaporation accounted for 25% of the pan evaporation in Jilin Province with a slight increasing trend over time. Among the many meteorological factors affecting the pan evaporation, the major factors were wind speed and daily temperature difference. The actual evaporation showed the significant response to the precipitation and daily temperature difference, the daily temperature difference was the more significant factor affecting the actual evaporation.

**Keywords:** climate change; variation trend of evaporation; Gaoqiao formula; Jilin Province

水分能量循环中,地面蒸发量占降水量的三分之二,是地表径流量的两倍<sup>[1]</sup>,且蒸发消耗大量太阳辐射能。因此蒸发量的变化影响全球水分循环和能量平衡,同时蒸发量的多少还会影响天气,在全球水循环和气候变化过程中起重要作用。蒸发作为大气—

水分循环系统的关键纽带,在陆面蒸发的估算、作物需水量以及水分平衡等方面具有极其重要的参考价值<sup>[2]</sup>。因此,关于蒸发的相关研究逐渐引起国内外研究者的关注<sup>[3-5]</sup>。目前,我国关于蒸发的研究主要集中在怒江流域<sup>[6]</sup>、长江流域<sup>[7]</sup>、黄河流域<sup>[8]</sup>等江河流

域。多数研究表明蒸发皿蒸发量整体呈减小趋势。长江、怒江、黄河以及东北诸河流域<sup>[4]</sup>的年平均水面蒸发量均明显减少,长江和淮河流域减少尤为显著,怒江和黄河流域减少也较明显。

气象站观测的蒸发量,代表的是一定水面蒸发量并不是实际蒸发量。蒸发观测易受气象站附近的气象条件影响<sup>[9]</sup>。实际蒸发量是从地面蒸发进入大气的水分。气象、土壤、植被量等因子都会对实际蒸发量产生影响。为此国内外研究了多种估算实际蒸发量的方法,并用于分析各地区实际蒸发的气候分布特征<sup>[10-11]</sup>。目前主要的估算方法多数计算繁琐、复杂,并且需要计算潜在热通量或潜在蒸散量。而潜在热通量和潜在蒸散量并不能通过日常观测获得,只能通过计算得到,这样就造成计算的结果可比性及误差较大。日本高桥浩一郎提出的高桥公式<sup>[12]</sup>通过影响蒸发的两个主要气象因子降水和温度来计算实际蒸发量,公式的模拟可靠性高,尽管计算简单却能较好的反映下垫面实际蒸发的变化<sup>[12]</sup>。该公式在我国得到广泛使用,东北、华北、西北地区蒸发研究中得到许多建设性的结果<sup>[13-14]</sup>。此类研究为研究一定区域内旱涝成因、能量变化、土壤水分调节、灌溉定额的制定、气候区划等方面提供一定的参考。但若以区域为单位,由于覆盖面大、范围广,其研究结果在精细度上存在一定程度的偏差,因此,以省为单位进行研究,可以提高研究的精细程度。

本文利用吉林省 45 个地面气象站 40 a 的实测资料,分析吉林省蒸发皿年蒸发量的气候分布特征,同时根据高桥公式估算实际蒸发量,并分析实际蒸发的分布情况。为吉林省的旱涝灾害成因以及可利用的水资源研究提供一定的参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源及处理

本文采用的是 1971—2010 年 40 a 吉林省 45 个气象站的温度、降水、风速、日照时数、20 cm 口径蒸发皿和大型蒸发皿的蒸发量等逐日观测资料。大型蒸发皿数据,根据换算系数<sup>[15]</sup>换算成 20 cm 口径蒸发皿的蒸发量后使用。同时对所有资料进行前期质量检测,对其中明显错误和不合理的数据进行删除并对个别的缺失数据进行插补。选择资料序列完整的 45 个气象站资料作为研究对象进行分析。

### 1.2 研究方法

本文选用精度较高的高桥公式对实际蒸发进行计算,同时引入气候倾向率和累计距平法对吉林省不同季节不同区域蒸发皿蒸发量和实际蒸发量的变化

进行趋势研究和突变分析,并对影响其变化趋势的因子进行分析辨别。为减少地面气象站点在空间上分布不均匀而造成的误差,借助 ArcGIS 中反距离权重法(IDW)对两种蒸发量进行空间插值分析。在分析蒸发量的时空分布时,在空间上将吉林省划分为西部白城地区、松原地区,中部长春地区、四平地区、辽源地区,东部吉林地区、延边地区、通化地区、白山地区 3 个部分。季节划分采用应用气候学中的方法,即 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月—来年 2 月为冬季。

1.2.1 高桥公式 为计算陆面实际蒸发,引入高桥公式,公式可以表示为:

$$E(R, T) = \frac{3100 \times R}{3100 + 1.8 \times R^2 \times \exp\left(-\frac{34.4 \times T}{235 + T}\right)} \quad (1)$$

式中:  $T$  为月平均温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $R$  为月降水量(mm);  $E(R, T)$  是陆面实际蒸发量。

本文主要借助线性倾向估计分析实际蒸发量的时空变化,同时引入气候倾向率以作为关键指标来反映蒸发变化趋势,并采用累计距平来对两种蒸发量随时间的变化进行突变分析。

1.2.2 完全相关系数 对蒸发量变化趋势的显著性及各气象因子对蒸发量的影响采用完全相关系数进行分析,并找出影响最大的因子:  $|QC| = C_1 \cdot C_2$ 。其中,  $|QC|$  为完全相关系数;  $C_1$  为某气象要素与蒸发的相关系数;  $C_2$  为某气象要素与时间的相关系数。当该气象要素与蒸发量相关系数通过信度为 95 % 的显著性检验,同时与时间相关系数通过信度为 95 % 的显著性检验时,其与蒸发量的完全相关系数才有存在的意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 吉林省蒸发皿蒸发量时空分布特征

2.1.1 蒸发皿蒸发量的年季变化 吉林省 4 个季节及全年蒸发皿蒸发量按年代进行统计,结果列于表 1。由表 1 可见,全年蒸发皿蒸发量在 1970 年代到 1990 年代呈下降趋势,尤其在 1980 年代和 1990 年代下降趋势明显,最低值在 1990 年代出现,和 1970 年代的蒸发量相比,减少 160.3 mm,下降约 10.8%。吉林省蒸发皿年蒸发量历年变化如图 1A 所示,可见吉林省全年蒸发皿年蒸发量呈下降趋势,平均每十年下降 27.6 mm。全年蒸发皿蒸发量累计距平历年变化情况如图 1B 所示,1970 年代到 1980 年代初蒸发皿蒸发量的累积距平是上升的,在 1983 年时出现了转折,1983—2001 年累积距平值下降,这就说明 1983 年之前全省蒸发皿年蒸发量是增加的,高于 40 a 的平均值;1983 年之后的蒸发量开始减少了,低于 40 a 的平均值。

表 1 吉林省不同年代蒸发皿蒸发量 mm

年代	春季	夏季	秋季	冬季	全年
1970 年代	540.5	567.5	287.9	77.7	1476.2
1980 年代	516.3	542.8	279.5	69.8	1408.5
1990 年代	488.1	543.4	278.4	71.2	1315.9
2000 年代	477.7	578.1	294.3	72.6	1324.4

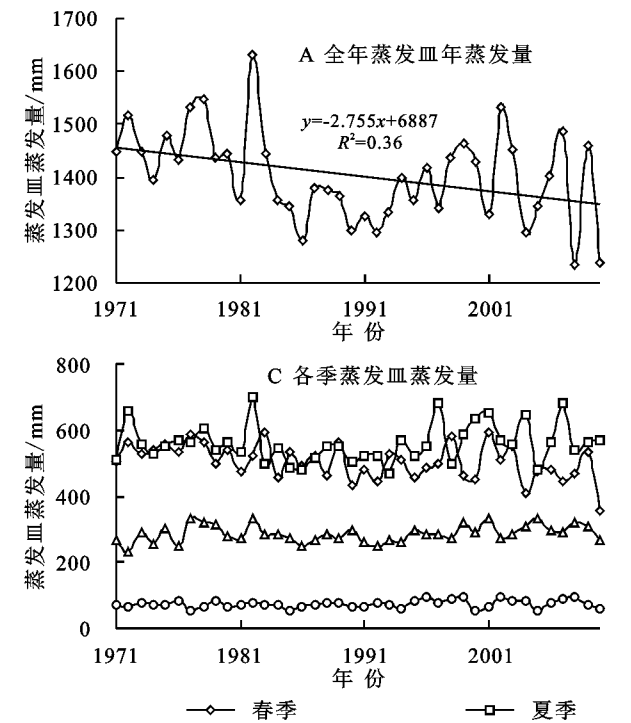


图 1 吉林省全年及各个季节蒸发皿蒸发量、蒸发皿蒸发量累计距平的历年变化

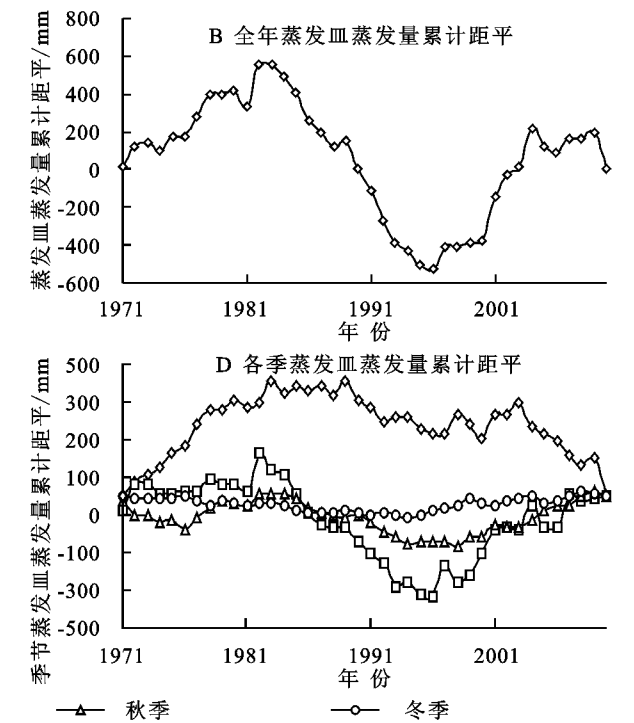
2.1.2 蒸发皿蒸发量的空间变化 吉林省不同地区不同年代际蒸发皿年蒸发量情况如表 2 所示。由表 2 可以看出,过去 40 a 不同年代际蒸发皿年蒸发量均呈现自西向东逐步减少的趋势。3 个地区蒸发量 1980 年代和 1990 年代的年蒸发量与 1970 年代相比是明显减少的。其中西部和中部地区蒸发量都是先减少后增加的。而东部地区蒸发量却始终是下降的,2000 年代与 1970 年代相比下降值最大,为 54.7 mm。

表 2 吉林省不同地区不同年代年蒸发皿平均蒸发量 mm/a

年代	西部	中部	东部	全省
1970 年代	1805.2	1552.6	1278.2	1476.2
1980 年代	1717.8	1474.8	1237.1	1408.5
1990 年代	1657.5	1448.3	1227.8	1315.9
2000 年代	1786.7	1512.2	1223.5	1324.4

吉林省年蒸发皿蒸发量和春季蒸发皿蒸发量在空间上的分布情况见图 2。由图 2 可以看出,吉林省 40 a 来全年与春季蒸发皿蒸发量空间分布形式基本是近似的,都是东部有减少趋势,中部、西部增加趋势不显著的分布形式,但是和全年蒸发皿蒸发量下降的区域相比春季下降区域要更多。其中中部的长春和辽源,东部的白城、松原的部分地区以及东南

分析吉林省每个季节蒸发皿蒸发量随着时间的变化曲线图 1C 及累计距平图 1D 发现,春季的蒸发皿蒸发量整体呈下降趋势,平均每十年下降 20.63 mm。而在夏季、秋季和冬季蒸发皿蒸发量前 20 a 呈下降趋势,后 20 a 呈上升趋势,但趋势不显著。



部的吉林、通化的部分地区蒸发下降显著。而在东岗、乾安、榆树 3 个地区的年蒸发量则显著上升。在其他 3 个季节中,蒸发量的分布形式是东西部增加,中部减少。夏、秋两季蒸发下降的区域增加,冬季则是蒸发上升的区域相对较大,蒸发下降的区域向中部地区收缩。

2.2 吉林省实际蒸发量气候分布特征

2.2.1 实际蒸发量的时间变化 利用高桥公式计算 40 a 吉林省实际蒸发量,并分析发现 40 a 实际蒸发量呈微弱上升趋势(图 3A),但上升趋势不明显,气候倾向率为 1.05 mm/10 a。比较实际蒸发量和蒸发皿蒸发量可以发现,吉林省的年实际蒸发量占蒸发皿年蒸发量的 25%。这种比例关系自东向西依次递减。其中最大值出现在集安,为 39%,最小值出现的地方是白城,仅 14%。全年实际蒸发在 1970 年—1990 年代中呈微弱上升趋势,在 2000 年代中出现下降,整体的变化幅度并不大。2000 年代与 1990 年代相比下降最多,为 15.6 mm,相比减少 4.3%。分析逐年累计距平曲线(图 3B),40 a 的实际蒸发量先减后增。从 1970 年代到 1980 年代初实际蒸发量的累积距平是下降的,在 1982 年出现转折,1982—1998 年累积

距平值上升。说明在 1982 年之前全省实际蒸发量减少,低于 40 a 平均值;1983—1998 年蒸发量增加,高

于平均值;1998 年以后小幅下降,大体上表现为增减交替出现的变化特征。

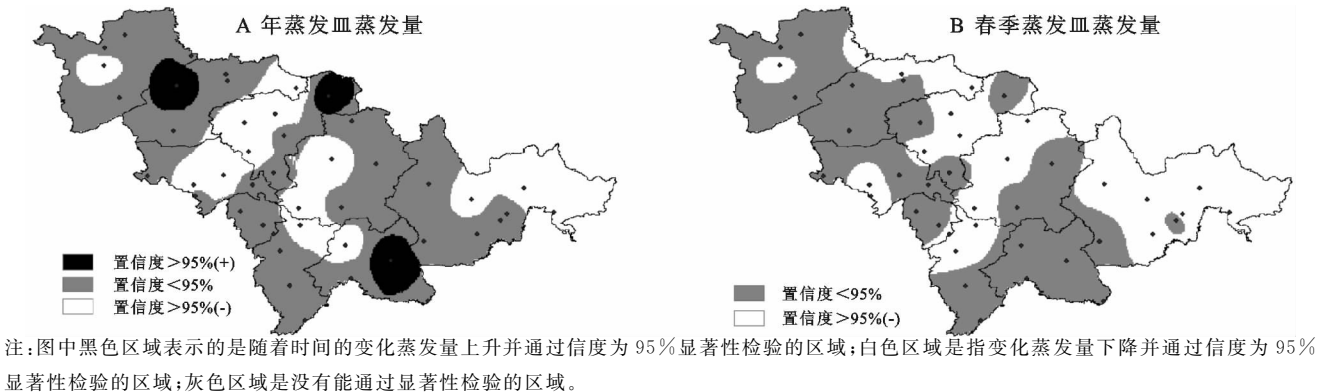


图 2 吉林省全年和春季蒸发皿蒸发量空间分布形式

春、夏、秋 3 个季节不同年代的实际蒸发量变化趋势与全年的变化趋势相似,呈微弱上升趋势(表 3),而冬季则在 1990 年代下降,之后在 2000 年代出现上升趋势。

从不同季节实际蒸发量变化曲线和累计距平图图 3C、图 3D 可以得出,春、夏、秋三季实际蒸发量存在微弱的上升趋势,而在冬季中蒸发量则呈下降趋势,但均不显著。

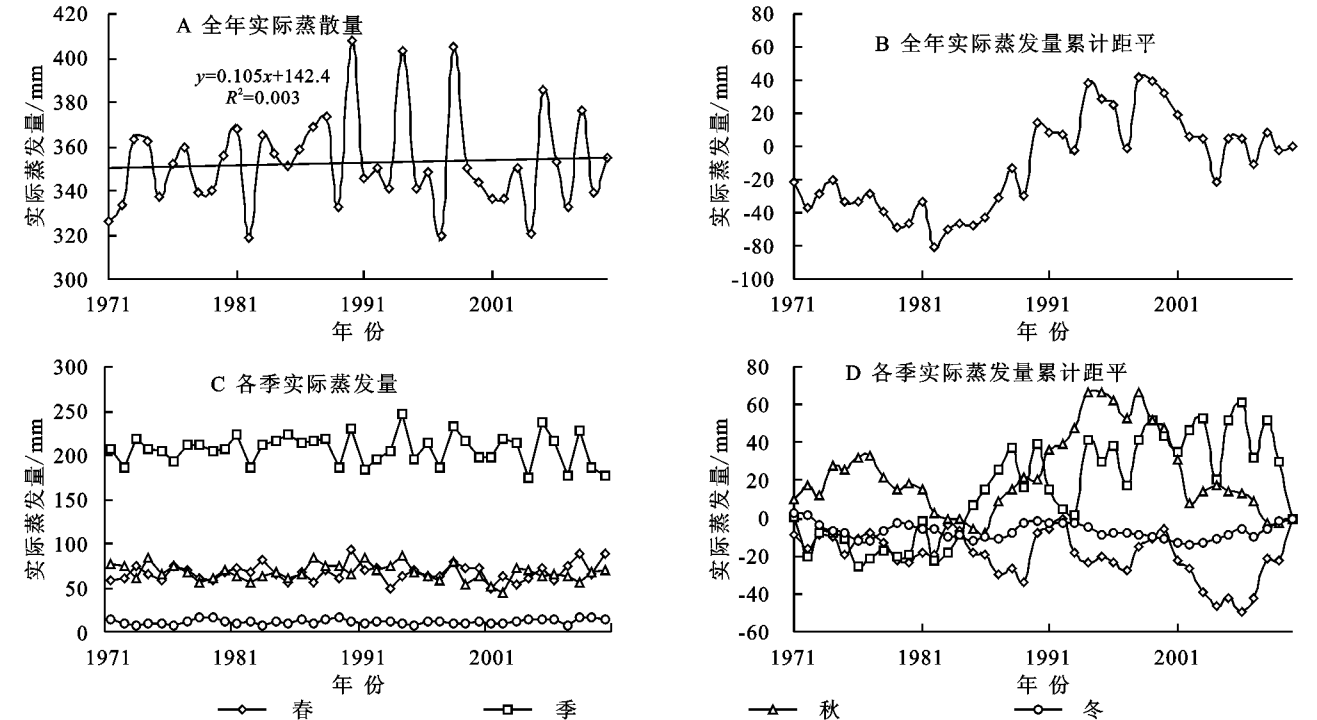


图 3 吉林省全年及各个季节的实际蒸发量、实际蒸发量累计距平的历年变化

表 3 吉林省不同年代实际蒸发量 mm

年代	春季	夏季	秋季	冬季	全年
1970 年代	64.5	204.6	68.6	11.2	349.1
1980 年代	65.9	210.5	67.6	11.4	354.9
1990 年代	69.4	210.9	70.0	10.7	360.1
2000 年代	68.0	202.1	62.2	12.4	344.5

2.2.2 实际蒸发量的空间变化 吉林省实际蒸发量在全省范围上变化并不明显(图 4)。由图可知,只有敦化地区实际蒸发量的变化通过了 95%显著性检验,呈显著上升趋势,气候倾向率为 9.1 mm/10 a。产生这种结果的原因可能与敦化地区地形等因素有

关,敦化地区地势构成为四周高、中部低,此地形对温度日较差、风速、日照、温度、降水等气象条件产生较大的影响。在各个季节中,实际蒸发量的空间分布形式基本上与图 4 形式相似。只是在影响范围和上升下降的程度上有所不同。实际蒸发量在春季和冬季呈下降趋势,而在夏秋两季则是为上升趋势,但变化趋势并不显著。

2.3 其他气象因子对蒸发的影响

1971—2010 年 40 a 中吉林省主要气象因子随时间的变化曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出,40 a 中吉

林省的温度、日照时数、温度日较差、平均风速的气候倾向率分别为  $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,  $-39.3\text{ h}/10\text{ a}$ ,  $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  和  $-0.3\text{ m}/(\text{s}\cdot10\text{ a})$ , 均通过显著性检验。

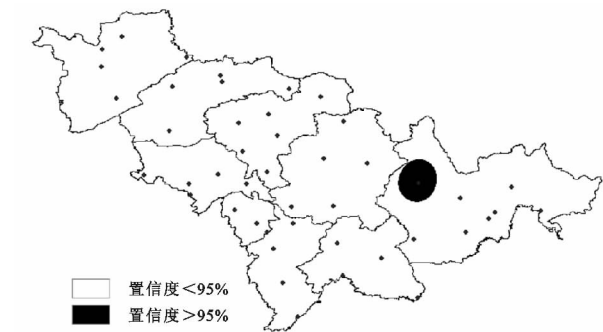


图 4 吉林省年实际蒸发量空间分布形式  
判断一个气象因子是否是蒸发皿蒸发量的决定

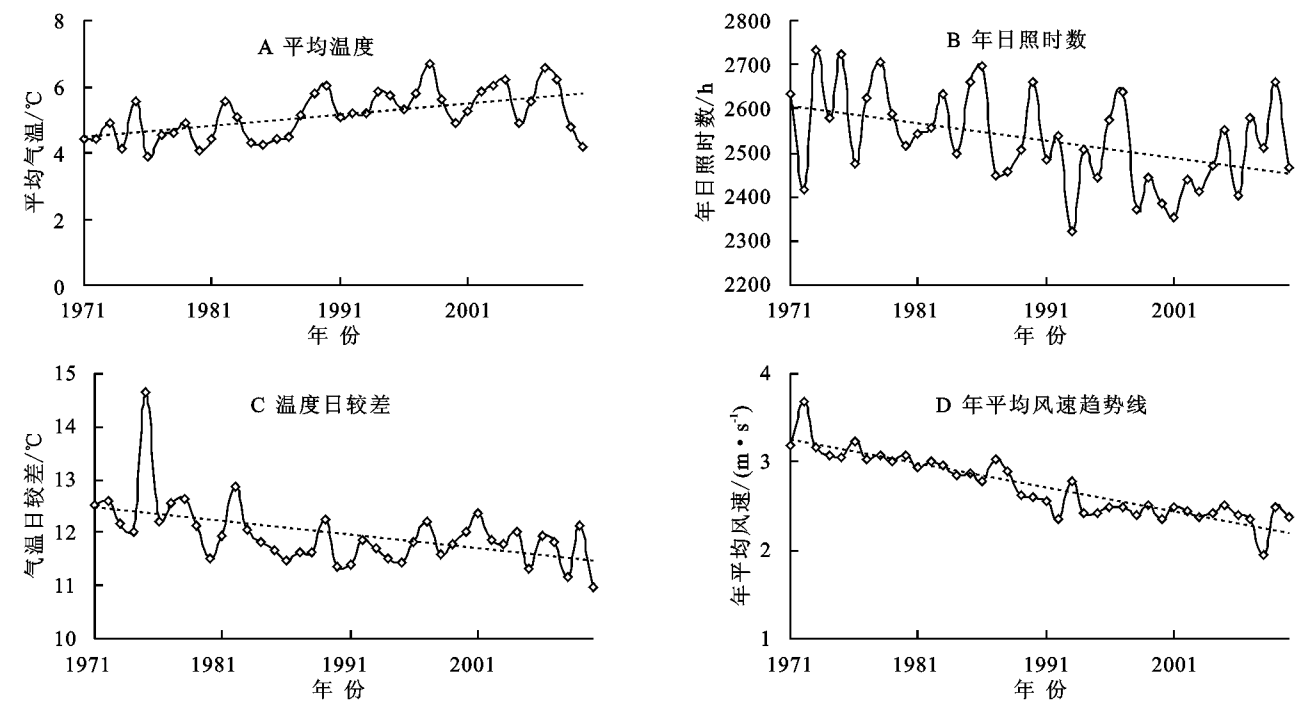


图 5 吉林省平均温度、年日照时数、温度日较差和年平均风速趋势线的历年变化

表 4 吉林省年蒸发皿蒸发量及实际蒸发量与各气象要素的相关系数

参数	系数	温度	降水	风速	日照时数	温度日较差
时间	相关系数	0.55 *	-0.03	-0.91 *	-0.43 *	-0.50 *
蒸发皿蒸发量	相关系数	-0.009	-0.42 *	0.46 *	0.15	0.58 *
	完全相关系数	—	—	0.42	—	0.29
年实际蒸发量	相关系数	0.025	0.67 *	-0.078	0.073	-0.45 *
	完全相关系数	—	—	—	—	0.23

注:样本量为 40; \* 表示通过信度 95% 的显著性检验。

3 结论

(1) 40 年来,吉林省蒸发皿年蒸发量显著下降,气候倾向率为  $-27.6\text{ mm}/10\text{ a}$ 。春季蒸发皿年蒸发量下降最快且显著下降,气候倾向率为  $-20.6\text{ mm}/10\text{ a}$ ,而夏、秋、冬 3 个季节的蒸发量呈上升趋势,不显著。在空

间上,吉林省 40 a 的蒸发皿蒸发量年季分布形式相似,均呈东部减少、中部部分减少、西部增加的趋势。春季蒸发下降显著的地区包括长春地区、辽源地区和吉林、通化、白城、松原的部分地区。夏、秋两季蒸发量下降区域向东部地区扩展。冬季蒸发上升区域较大,下降区域则收缩到中部的长春地区附近。

间上,吉林省 40 a 的蒸发皿蒸发量年季分布形式相似,均呈东部减少、中部部分减少、西部增加的趋势。春季蒸发下降显著的地区包括长春地区、辽源地区和吉林、通化、白城、松原的部分地区。夏、秋两季蒸发量下降区域向东部地区扩展。冬季蒸发上升区域较大,下降区域则收缩到中部的长春地区附近。

(2) 实际蒸发量反映出地面蒸发状况与蒸发皿蒸发量相反。全省的年实际蒸发量占蒸发皿年蒸发量的 25%, 这个比例在全省范围上由西部向东南部呈阶梯状增加。近 40 a 来吉林省年实际蒸发量呈上升趋势, 变化趋势不显著。春、夏、秋三季实际蒸发量存在微弱的上升趋势, 而在冬季中蒸发量则呈下降趋势, 变化趋势均不显著。

(3) 过去 40 a 中风速和温度日较差是影响蒸发皿年蒸发量变化的主要因子。其中风速与蒸发量的完全相关系数最大为 0.42, 其次是温度日较差为 0.29。降水在 40 a 中的变化趋势并不显著, 温度日较差与年实际蒸发量的完全相关系数为 0.23, 因此影响实际蒸发量变化的主要原因是温度日较差。

#### 参考文献:

- [1] Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. *Nature*, 1992, 359(6394): 373-380.
  - [2] 申双和, 盛琼. 45 年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J]. *气象学报*, 2008, 66(3): 452-460.
  - [3] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964—1998[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 83-91.
  - [4] 朱红蕊, 刘赫男, 张洪玲, 等. 1971—2010 年黑龙江省蒸发量气候变化特征[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(3): 63-68.
  - [5] Roderick M L, Farquhar G D. The Cause of Decreased Pan Evaporation over the past 50 Years[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
  - [6] 杜军, 房世波, 唐小萍, 等. 1981—2010 年西藏怒江流域潜在蒸发量的时空变化[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(1): 35-42.
  - [7] 王艳君, 姜彤, 许崇育, 等. 长江流域 1961—2000 年蒸发量变化趋势研究[J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(3): 99-105.
  - [8] 曾燕, 邱新法, 刘昌明. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[C]//中国气象学会 2005 年年会论文集, 2005.
  - [9] 高国栋, 陆渝蓉, 李怀瑾. 我国陆面蒸发量和蒸发耗热量的研究[J]. *气象学报*, 1980, 38(2): 165-176.
  - [10] 刘波, 马柱国, 丁裕国. 中国北方近 45 年蒸发变化的特征及与环境的关系[J]. *高原气象*, 2006, 25(5): 840-848.
  - [11] 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 259-269.
  - [12] 文敏, 陈创买. 珠海市近 50 年水资源变化特征及评估[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2005, 44(S): 272-275.
  - [13] 付菁, 范广洲, 周定文. 高桥公式在拉萨地区的适用性分析及其修正[C]//中国气象学会年会, 2011.
  - [14] 陶云, 赵获, 何华, 等. 云南省大气中水资源分布特征初探[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(4): 506-515.
  - [15] 任芝花, 黎明琴, 张纬敏. 小型蒸发器对 E-601 B 蒸发器的折算系数[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 508-512.
- 
- (上接第 196 页)
- [2] Walling D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers[J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3): 192-216.
  - [3] 刘成, 王兆印, 隋觉义. 我国主要入海河流泥沙变化分析[J]. *水利学报*, 2007, 38(12): 1444-1452.
  - [4] 朱红艳, 韩彩波, 贾志峰, 等. 泾河张家山水文站水沙特性分析及工程实例[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 48-55.
  - [5] 颜明, 郑明国, 舒畅, 等. 泾河流域径流—泥沙的尺度效应研究[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 184-188.
  - [6] 崔小红, 周祖昊, 邱林. 泾河流域水沙特性空间尺度变化分析[J]. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2013, 34(3): 51-54.
  - [7] 郭爱军, 黄强, 畅建霞, 等. 基于 Copula 函数的泾河流域水沙关系演变特征分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4): 673-683.
  - [8] 张金萍, 丁志宏, 郭兵托. 泾河水沙丰枯演化规律及组合遭遇风险研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(1): 11-16.
  - [9] 冉大川, 刘斌, 罗全华, 等. 泾河流域人为活动对水沙变化的影响分析: 兼议泾河流域治理方略[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6): 32-35.
  - [10] 赵姣, 李志, 刘文兆, 等. 泾河流域潜在蒸散量的时空变异[J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5600-5608.
  - [11] Sklar M. Fonctions de repartition an dimensions et leurs marges[J]. *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris*, 1959, 8: 229-231.
  - [12] 丁志宏, 张金良, 冯平. 黄河中游汛期水沙联合分布模型及其应用[J]. *吉林大学学报(地)*, 2011, 41(4): 1130-1135.
  - [13] 邱小霞, 刘次华, 吴娟. Copula 函数中参数极大似然估计的性质[J]. *经济数学*, 2008, 25(2): 210-215.
  - [14] Joe H. Multivariate models and multivariate dependence concepts[M]. Chapman and Hall/Crc, 1997.