

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2013.03.007

王荣英,李新,陈瑞敏,等.衡水市参考作物蒸散量的时空变化特征及其气候成因[J].中国农业气象,2013,34(3):294-300

# 衡水市参考作物蒸散量的时空变化特征及其气候成因<sup>\*</sup>

王荣英,李 新,陈瑞敏,吴 雁

(衡水市气象局,衡水 053000)

**摘要:**参考作物蒸散量是计算作物需水量的关键,是进行实时灌溉预报和农田水分管理的主要参数。本文基于 1981-2010 年衡水市 11 个站点的地面气象观测资料,利用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量 ( $ET_0$ ),通过小波分析、突变检验等方法分析其时空变化特征,并采用相关分析法初步探讨其气候成因。结果表明,(1)近 30a 衡水市年参考作物蒸散量呈显著下降趋势 ( $P < 0.05$ ),除 2、3 月外,其它月份的参考作物蒸散量均有下降趋势;衡水东北部年参考作物蒸散量较大,西南部及安平较小,年参考作物蒸散量较大的地区其下降速率也较大,较小的地区其下降速率也较小。(2)衡水市年参考作物蒸散量存在准 6a 的主要振荡周期,周期显著,6、8 和 12 月以及全年参考作物蒸散量均发生了气候突变;全区一致型是衡水市年及月参考作物蒸散量变化的最主要的空间模态,且其空间分布均具有很好的收敛性。(3)气温日较差、最高气温、日照时数和相对湿度是影响参考作物蒸散量变化的关键气候因子,其影响程度因季节而异, $ET_0$ 与气温日较差、最高气温和日照时数呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ),与相对湿度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ),风速变化对  $ET_0$ 影响较小;其中 5-9 月  $ET_0$ 受日照时数影响最大,受气温日较差、相对湿度和最高气温的影响依次减小。

**关键词:**参考作物蒸散量 ( $ET_0$ );Penman-Monteith 公式;时空演变;气候成因;衡水市

## Spatial and Temporal Variation of Reference Crop Evapotranspiration in Hengshui

WANG Rong-ying, LI Xin, CHEN Rui-min, WU Yan

(Hengshui Meteorological Bureau, Hebei Province, Hengshui 053000, China)

**Abstract:** Reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) was a key factor to calculate crop water requirement and a main parameter to forecast real irrigation amount. The characteristics of  $ET_0$  and its major climate influence factors were analyzed by using Morlet wavelet analysis, M-K abrupt change testing and correlation analysis method, based on surface meteorological data of 11 stations in Hengshui from 1981 to 2010. The main results showed that the annual  $ET_0$  decreased fluctuant, and the decline rate was significant. The monthly  $ET_0$  was declined, except for February and March. The annual  $ET_0$  in the northeast Hengshui was larger than that of the southwest. The larger annual  $ET_0$ , the more annual  $ET_0$  declined, and vice versa. The annual  $ET_0$  had a significant quasi-6 years oscillation period. High consistency was the main spatial characteristic about annual and monthly  $ET_0$ . Diurnal temperature range, maximum temperature, sunshine duration and relative humidity were the most important meteorological factors that affected the  $ET_0$ , and the degree of their influence changed with the season. There was significant positive correlation between  $ET_0$  and diurnal temperature range and maximum temperature and sunshine duration, and negative correlation between  $ET_0$  and relative humidity. While the effect of wind speed on  $ET_0$  was weak. Among all the factors which had significant influences on the  $ET_0$  from May to September, sunshine duration had the most prominent impact, diurnal temperature range, relative humidity and maximum temperature also had evident influences on the  $ET_0$ .

**Key words:** Reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ); Penman-Monteith equation; Spatial and temporal variation; Climate causes; Hengshui

\* 收稿日期:2012-09-02

基金项目:河北省气象局项目“衡水市参考作物蒸散量的时空分布特征”(11KY38)

作者简介:王荣英(1979-),女,河北武邑人,硕士,工程师,主要从事农业气象和天气气候研究。

E-mail:wry\_1979@163.com

衡水市位于河北省东南部的平原地区,属温带半干旱地区,大陆性季风气候,光热资源丰富,无霜期长,自然降水少,且集中在夏季<sup>[1]</sup>。该地区自然降水严重不足,为满足农业生产需要,地下水被大量开采和超采,因超采严重,衡水市成为 2007 年河北省国土资源厅公布的全省两个最大的地下水漏斗之一,这对于主要依赖地下水进行农业灌溉的衡水来说农业用水形势尤为严峻。发展节水农业已成为解决衡水市水资源供需矛盾的一个重要途径<sup>[2-4]</sup>。参考作物蒸散量( $ET_0$ )是计算作物需水量的关键,是进行实时灌溉预报和农田水分管理的主要参数<sup>[5-8]</sup>。近几十年来,针对参考作物蒸散量已有大量研究<sup>[9-17]</sup>。Hidalgo 等<sup>[9]</sup>研究了美国加州潜在蒸散变化之源,发现日潜在蒸散变化与净辐射、相对湿度和云量密切相关;Thomas<sup>[10]</sup>利用 1954 – 1993 年 65 个台站的月气象资料分析了中国潜在蒸发的时空变化趋势,发现东北和西南地区潜在蒸发呈增加趋势,西北和东南则为下降趋势;张山清等<sup>[14-15]</sup>发现 1959 – 2007 年吐鲁番地区参考作物蒸散量呈明显的减小趋势,新疆夏半年参考作物蒸散量呈极显著减小趋势;陈超等<sup>[16]</sup>认为日照时数是导致四川盆地参考作物蒸散量减少的主要原因;李春强等<sup>[17]</sup>认为,1965 – 1999 年风速和日照时数是河北省参考作物蒸散量下降的主要原因,而气温升高对其影响不显著。不同区域的气候特点不同,对参考作物蒸散量的贡献率也有所不同,因此研究衡水市参考作物蒸散量的时间、空间变化特征及其成因,对衡水市更好地利用水资源,解决水资源供需矛盾具有十分重要的意义。

1 资料与方法

衡水市 11 个气象站 1981 – 2010 年的常规地面

气象观测资料包括逐月平均气温、最高气温、最低气温、气温日较差、日照时数、降水量、相对湿度、平均风速和水汽压等,数据均经过河北省气候中心的质量控制,来源可靠。利用 FAO 推荐的 Penman – Monteith 方程,计算月以及年参考作物蒸散量,应用气候变化倾向率、逐步回归、Morlet 小波分析、M – K 突变检验和经验正交分解<sup>[18]</sup>等统计方法,分析衡水市参考作物蒸散量的时空变化特征。研究区各站点分布见图 1。

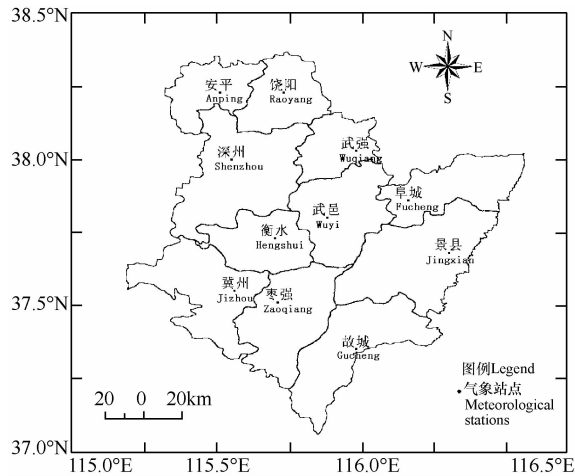


图 1 衡水市 11 个气象站点分布图  
Fig. 1 Geographical distribution of 11 meteorology stations in Hengshui, Hebei province

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸散量时空分布特征

2.1.1 年参考作物蒸散量

1981 – 2010 年衡水各站平均年参考作物蒸散量等值线见图 2a。由图可见,蒸散量最大值出现在 1982 年的武强,为 1659.2mm,最小值为 1212.4mm,

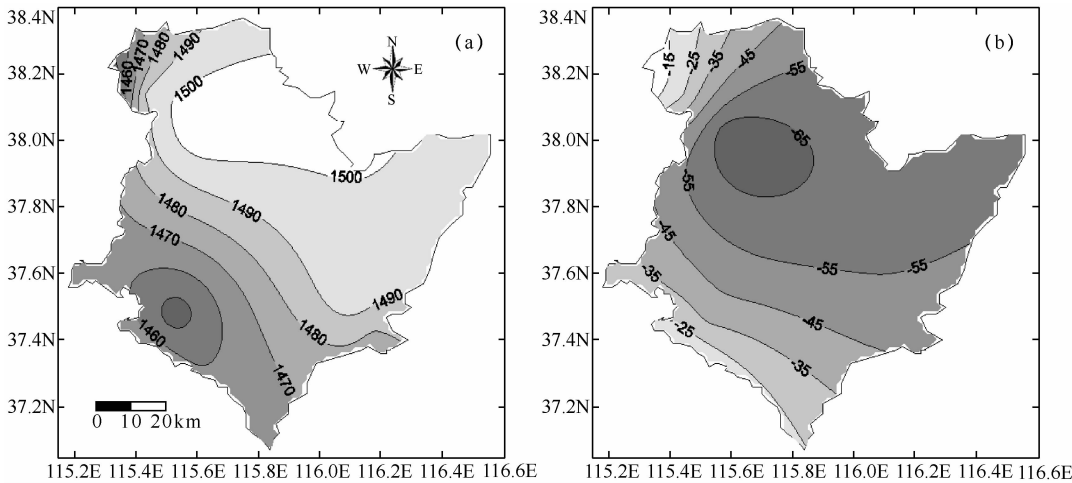


图 2 1981 – 2010 年衡水市年平均参考作物蒸散量 (a, mm) 及其年际变化趋势 (b, mm/10a) 的空间分布  
Fig. 2 The spatial distribution of annual reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ , mm) (a) and its trend (mm/10y) (b) in Hengshui from 1981 to 2010

1996 年出现在安平,二者相差达 446.8mm。由图 3 可见,1981-2010 年衡水全区平均年  $ET_0$  呈下降趋势,其线性倾向率为  $-31.8\text{mm}/10\text{a}$  ( $P < 0.05$ ),但各站表现不完全相同(图 2b)。中东部各站年  $ET_0$  下降趋势较明显,据统计,武强站下降趋势最强,其线性倾向率达到了  $-72.1\text{mm}/10\text{a}$  ( $P < 0.01$ ),其次是阜城站,为  $-52.5\text{mm}/10\text{a}$  ( $P < 0.01$ ),景县和深州站为  $-47.5 \sim -42.3\text{mm}/10\text{a}$  ( $P < 0.01$ ),武邑为  $-3.97\text{mm}/10\text{a}$  ( $P < 0.05$ ),其它各站年  $ET_0$  变化趋势不明显。

总体上,对比图 2a 和图 2b 可以发现,年  $ET_0$  较大的地区其下降速率也较大,较小的地区其下降速率也较小。

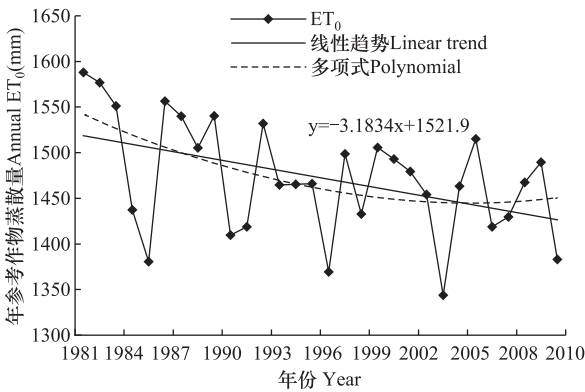


图 3 衡水市年参考作物蒸散量的年际变化  
Fig. 3 The variety of annual  $ET_0$  in Hengshui

2.1.2 月参考作物蒸散量

分别计算衡水市 11 站的月参考作物蒸散量,取其平均值,逐月计算衡水市参考作物蒸散量。结果表明,5 月和 6 月参考作物蒸散量最大,分别为 198.8mm 和 201.3mm,1 月和 12 月最小,分别为 41.4mm 和 42.7mm。由图 4 可见,各月  $ET_0$  的变化呈典型的抛物线型。

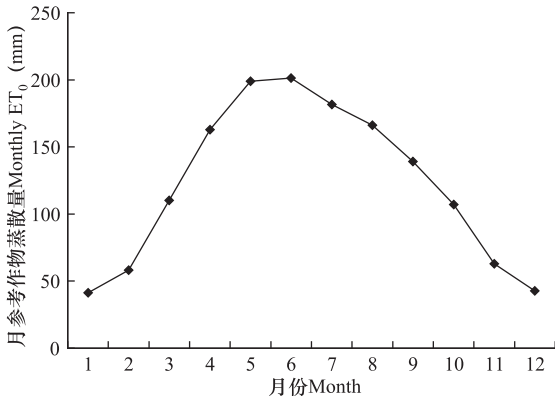


图 4 衡水市参考作物蒸散量的月际变化  
Fig. 4 The variety of monthly  $ET_0$  in Hengshui

衡水市各月参考作物蒸散量近 30a 的线性变化趋势如表 1。由表可见,2、3 月的线性倾向率为正值,表现为微弱的上升趋势,其它月为负值,表现为下降趋势,其中仅 8 月通过 0.05 的显著性检验,下降趋势显著。

表 1 1981-2010 年衡水市月参考作物蒸散量的线性变化趋势 (mm/10a)

Table 1 The linear trend rate of monthly $ET_0$ in Hengshui from 1981 to 2010 (mm/10y)												
1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	12 月 Dec.	年 Year
-0.95	1.12	2.09	-4.71	-2.55	-6.07	-5.29	-6.06 *	-5.11	-3.41	-0.36	-0.54	-31.80 *

注: \* 表示  $P < 0.05$ 。Note: \* is  $P < 0.05$ 。

依次计算衡水市 11 站近 30a 的月平均参考作物蒸散量,利用 Kriging 空间插值法逐月绘制其空间分布图,发现 4-10 月各月  $ET_0$  与年  $ET_0$  的空间分布特征相似(图 5 中以 9 月为代表),即东北部为大值区,西南部及安平为小值区,冀州和武邑之间等值线密度较大(等值线呈西北-东南向分布),月  $ET_0$  的变化梯度较大;1-3 月大值区分布在南部和北部,中西部为小值区,并在景县有一个小值中心(图 5 中以 2 月为代表);11-12 月的大值区则分布在南部或东南部(图 5 中以 11 月为代表)。

2.2 参考作物蒸散量的周期演变特征

用 Morlet 小波方法分析衡水市 1981-2010 年年参考作物蒸散量的周期演变特征(图 6),由图 6 可见,其存在准 6a 的主要振荡周期,且通过了 0.05 水平的显著性检验,说明变化周期显著。按照准 6a 的周期演变,对应其小波实部图可以发现,2008-2011 年年  $ET_0$  呈减少趋势,并推测 2012-2015 年年  $ET_0$  应该进入增加的周期。

分析全区各月参考作物蒸散量的周期演变特征,根据主要振荡周期的显著水平选择有代表性的列于图 6 中,由图可见,9 月周期振荡性很强,其主要振荡周期为 6a,其方差值远超过了 0.01 水平显著线,说明变化周期异常显著,按照此振荡周期,对应其小波实部图可以推测 2012-2015 年 9 月  $ET_0$  处于增加阶段(图 6b);2、3、4、5 和 11 月分别存在 5、6、6、7 和 3a 的主振荡周期,均通过了 0.05 水平的显著性检验,其中 3 月和 5 月的周期显著性(图 6 中以 5 月代表)强于 2、4 和 11 月(图 6 中以 4 月代表),其它月的周期性较弱(图 6 中以 7 月代表)。

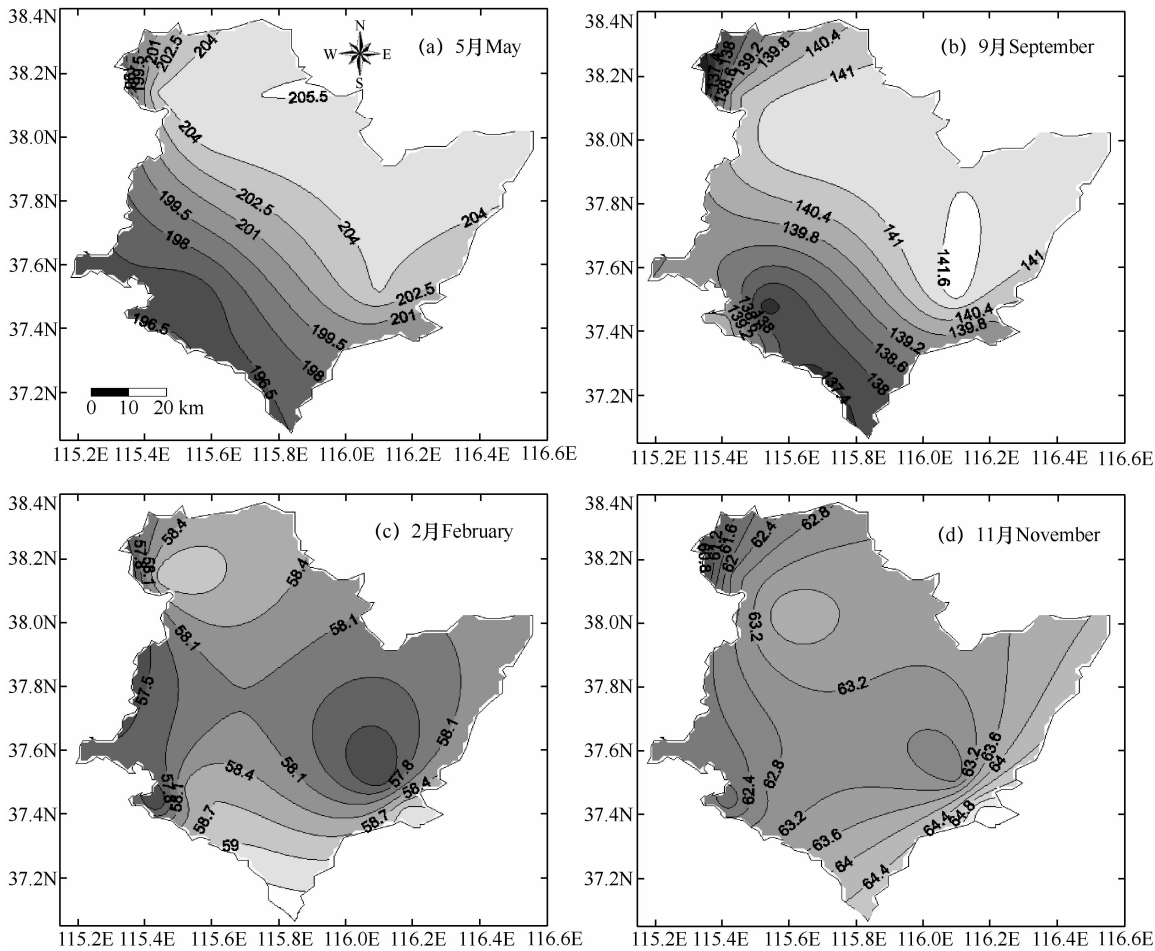


图 5 典型月参考作物蒸散量 (mm) 的空间分布图

Fig. 5 The spatial distribution of typical month  $ET_0$  (mm)

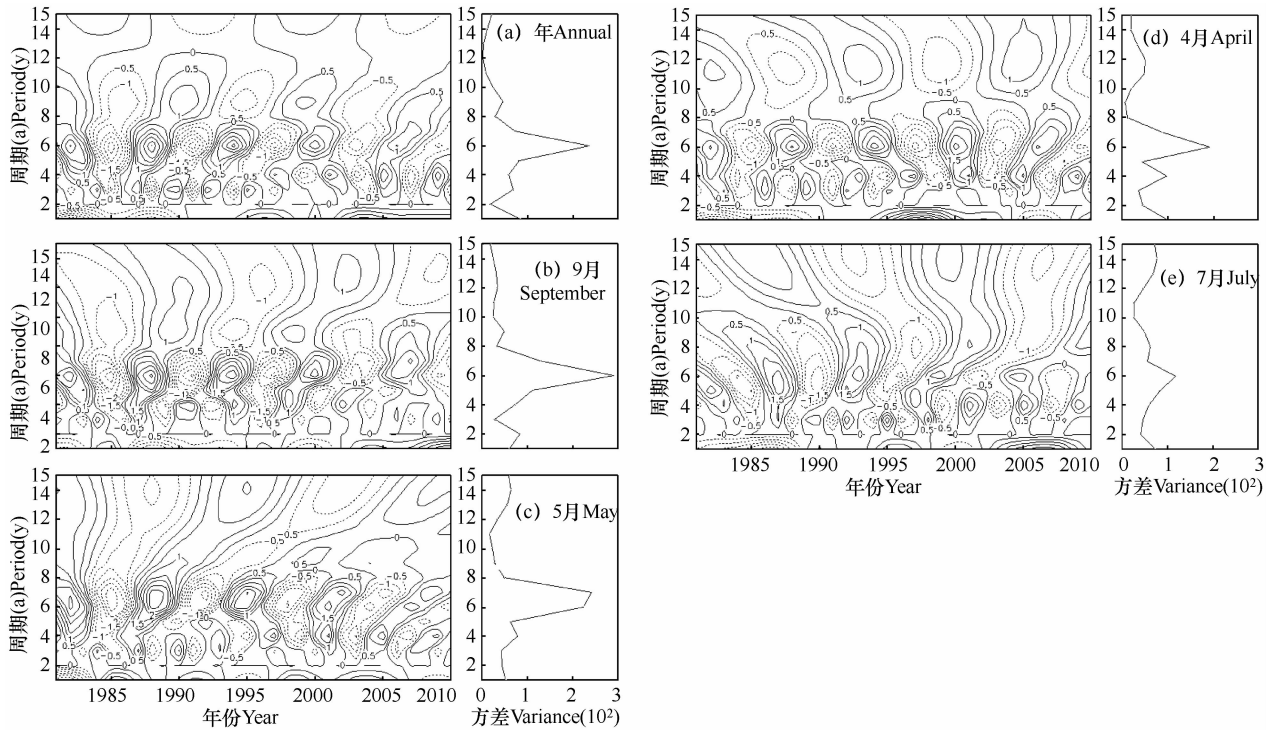


图 6 参考作物蒸散量的 Morlet 小波变化及其方差分析

Fig. 6 The statistical analysis of the wavelet transform coefficients for  $ET_0$

2.3 参考作物蒸散量的突变检验

用 Mann - Kendall 突变检验法对衡水市年和月参考作物蒸散量进行检验,结果表明,1981 - 2010 年年  $ET_0$  (图 7a) 均表现为下降趋势,其下降趋势达到或接近显著水平,并在 1983 年前后存在气候突变。月参考作物蒸散量的突变检验显示,各月中仅 4 月在 1996 - 2004 年变化趋势达到显著下降趋势 (图 7b); 6、8 和 12 月依次在 1993、2008 - 2009 和 1983 - 1984 年发生了气候突变。

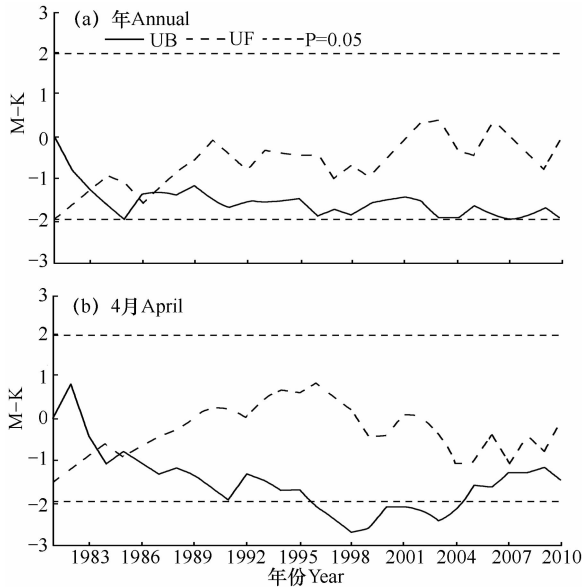


图 7 参考作物蒸散量的突变检验

Fig. 7 The abrupt change testing of  $ET_0$

2.4 参考作物蒸散量变化的空间特征

分别对年、月参考作物蒸散量进行 EOF 经验正交分解,前 4 个模态的方差贡献率如表 2 所示,1 - 3 月、11 - 12 月第 1 模态的方差贡献率均超过了 90%,说明其  $ET_0$  升高或降低的一致性极强,年及 7 月第 1 模态的方差贡献率最小,但也均超过 65%,说明衡水

市年及月  $ET_0$  变化的一致性均较好;年及月的前 2 个模态的累积方差贡献率均超过 75%,表明其空间分布均具有很强的收敛性。

表 2 年、月参考作物蒸散量 EOF 分解的方差贡献率 (%)  
Table 2 Variance contribution rate of yearly and monthly  $ET_0$  expanded by EOF (%)

	第 1 模态 1 <sup>st</sup> feature	第 2 模态 2 <sup>nd</sup> feature	第 3 模态 3 <sup>rd</sup> feature	第 4 模态 4 <sup>th</sup> feature	累计 Total
	vector	vector	vector	vector	
年 Year	65.89	12.39	5.68	4.41	88.37
1 月 Jan.	91.70	2.50	1.91	0.97	97.08
2 月 Feb.	95.23	1.43	1.00	0.79	98.45
3 月 Mar.	92.85	2.34	1.38	1.01	97.58
4 月 Apr.	84.01	4.99	3.32	2.31	94.63
5 月 May	82.97	4.67	3.29	2.81	93.74
6 月 Jun.	77.00	6.38	4.12	3.32	90.82
7 月 Jul.	66.04	9.57	6.47	5.16	87.24
8 月 Aug.	73.89	6.43	5.36	4.01	89.69
9 月 Sep.	83.28	4.54	3.67	2.36	93.85
10 月 Oct.	86.51	4.95	2.65	2.03	96.14
11 月 Nov.	94.30	1.93	1.17	0.73	98.13
12 月 Dec.	93.39	2.11	1.31	0.87	97.68

对比分析年及月参考作物蒸散量第 1 特征向量场的空间分布 (图略),年及各月均表现为全区一致的正荷载,表明衡水市各站点年及月  $ET_0$  升高或降低的步调具有一致性,其中年、4、5、6、7 及 8 月的空间分布较相似,在南部和北部各有一个低值中心,西部和景县各有一个高值中心,中部似鞍型场形状;1、3 和 12 月分布相似,在枣强附近有一个低值中心,并向中部延伸,而东部、西部和北部的特征向量值相对较高;2 月和 11 月相似,在饶阳和武强的西部有一个闭合的低值中心,并向枣强方向延伸。因 4、5、6、7 和 8 月的  $ET_0$  较大,对年  $ET_0$  起着决定性的作用,所以年  $ET_0$  第 1 特征向量场的分布与其相似是必然的。

衡水市年及月参考作物蒸散量第 2 特征向量场的空间分布大致分为两种截然相反的类型 (图 8)。

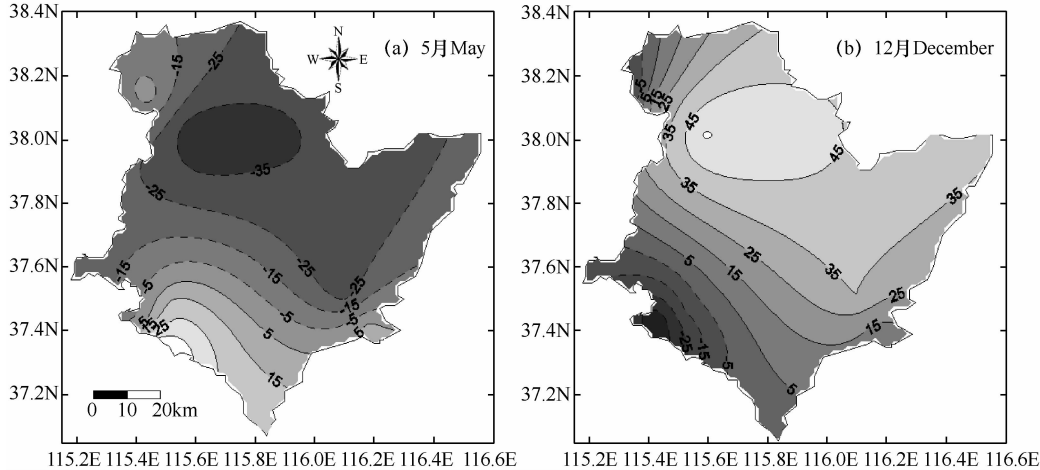


图 8 参考作物蒸散量第 2 特征向量场的典型空间分布

Fig. 8 The typical spatial distribution of the 2<sup>nd</sup> eigenvector of  $ET_0$  expanded by EOF

(1)年、1、3、4、5、6、7、9 及 10 月的空间分布(图 8 中以 5 月为代表)相似,在衡水市西南部的枣强附近有一个正荷载中心,北部的深州至武强有一个闭合的负荷载中心,并向景县方向延伸,这种分布的空间场表明当东北部的  $ET_0$  下降时,西南部的枣强  $ET_0$  则为上升;(2)8、11 和 12 月的空间分布场(图 8 中以 12 月为代表)与以上几个空间分布场正好相反,负荷载中心对应正荷载中心,正荷载中心对应负荷载中心,即当西南部的枣强其  $ET_0$  下降时,东北部  $ET_0$  则上升。2 月的空间分布与该类相近,不同的是其负荷载区转移到了南部(图略)。

2.5 参考作物蒸散量变化的气候成因

对衡水市参考作物蒸散量与平均气温( $T$ )、最低气温( $T_{\min}$ )、最高气温( $T_{\max}$ )、气温日较差( $T_{\max-\min}$ )、日照时数( $S$ )、降水量( $R$ )、平均风速( $U$ )、水汽压( $E_0$ )和相对湿度( $RH$ )共 9 项因子,从年平均和月平均两个方面依次进行相关分析( $N=30$ ),其结果见表 3。由表可见,年平均和月平均  $ET_0$  与气温日较差、最高气温、日照时数和相对湿度的相关系数基本都在 0.6 以上,且均通过了 0.01 水平的显著性检验, $ET_0$

与前三项呈极显著正相关,与相对湿度呈极显著负相关; $ET_0$  与最低气温的相关关系不明显,与平均气温和平均风速多呈显著正相关,与降水量和水汽压多呈显著负相关。比较而言,最低气温对  $ET_0$  的影响不大;夏半年 3-9 月  $ET_0$  与日照时数的相关系数最高,相关性最强;1、2 月最高气温对  $ET_0$  的影响最大,5 月日照时数和相对湿度对  $ET_0$  的影响最大,其它月对  $ET_0$  影响最大的两个气候要素均为气温日较差和日照时数。

由此可以看出,影响参考作物蒸散量的主要气候因子随着季节的变化而变化,冬季(12 月-翌年 2 月)平均气温多在  $0^{\circ}\text{C}$  左右或低于  $0^{\circ}\text{C}$ ,此时土壤多为冻结状态,受最高气温的影响较大,日照时数对  $ET_0$  的影响弱于气温日较差;3-9 月日照时数对  $ET_0$  的影响明显增强,其影响程度超过了气温日较差,成为影响最大的气候因子,而最高气温的影响明显减弱;9-11 月气温日较差的影响逐渐增强,相关系数达到了 0.9 以上,日照时数对  $ET_0$  的影响变化不大;平均风速在 5-8 月和 11 月-翌年 1 月对参考作物蒸散量影响显著,在冬末春初和秋季影响不明显;相对湿度对参考作物蒸散量的影响规律随季节变化不明显。

表 3 衡水市参考作物蒸散量与各气候因子的相关系数

Table 3 The correlation coefficient between  $ET_0$  and climate factors in Hengshui

	气温 $T$	最低气温 $T_{\min}$	最高气温 $T_{\max}$	气温日较差 $T_{\max-\min}$	日照时数 $S$	降水量 $R$	平均风速 $U$	水汽压 $E_0$	相对湿度 $RH$
年 Year	0.000	-0.341	0.418 *	0.824 **	0.931 **	-0.056	0.570 **	-0.620 **	-0.670 **
1 月 Jan.	0.591 **	0.242	0.869 **	0.814 **	0.791 **	-0.656 **	0.498 **	-0.414 *	-0.841 **
2 月 Feb.	0.616 **	0.287	0.836 **	0.837 **	0.827 **	-0.520 **	0.341	-0.304	-0.777 **
3 月 Mar.	0.710 **	0.466 **	0.831 **	0.873 **	0.941 **	-0.454 *	0.163	-0.360	-0.840 **
4 月 Apr.	0.454 *	0.060	0.667 **	0.857 **	0.872 **	-0.215	0.355	-0.540 **	-0.788 **
5 月 May	0.692 **	0.180	0.850 **	0.873 **	0.933 **	-0.496 **	0.550 **	-0.730 **	-0.921 **
6 月 Jun.	0.571 **	0.091	0.697 **	0.867 **	0.959 **	-0.185	0.496 **	-0.564 **	-0.758 **
7 月 Jul.	0.602 **	0.144	0.760 **	0.855 **	0.980 **	-0.259	0.602 **	-0.422 *	-0.815 **
8 月 Aug.	0.482 **	0.004	0.711 **	0.874 **	0.985 **	-0.131	0.403 *	-0.241	-0.728 **
9 月 Sep.	0.405 **	-0.112	0.717 **	0.914 **	0.979 **	-0.430 *	0.343	-0.332	-0.830 **
10 月 Oct.	0.223	0.001	0.857 **	0.935 **	0.873 **	-0.563 **	0.250	-0.400 *	-0.840 **
11 月 Nov.	0.555 **	-0.270	0.615 **	0.902 **	0.962 **	-0.494 **	0.396 *	-0.531 **	-0.836 **
12 月 Dec.	0.357	-0.151	0.830 **	0.888 **	0.882 **	-0.683 **	0.587 **	-0.610 **	-0.843 **

注: \*、\*\* 分别表示相关系数通过 0.05、0.01 水平的显著性检验。      Note: \* is  $P<0.05$ , \*\* is  $P<0.01$ .

3 结论与讨论

(1)1981-2010 年衡水市年参考作物蒸散量呈显著下降趋势( $P<0.05$ ),其平均下降速率为  $31.8\text{ mm}/10\text{a}$ ;2、3 月表现为微弱的上升趋势,其它月表现为下降趋势,其中 8 月下降趋势显著。李春强等<sup>[17]</sup>研究了 1965-1999 年河北省  $ET_0$  的变化,认为年及春、夏、秋、冬四个季节  $ET_0$  均呈显著下降趋势,其中年  $ET_0$  的下降速率为  $43.58\text{ mm}/10\text{a}$ ,与本研究相比,趋势相同、下降速率偏大。衡水市年  $ET_0$  较大的地区

其下降速率也较大,较小的地区其下降速率也较小。衡水市月参考作物蒸散量以 5、6 月最大,1、12 月最小,全年变化曲线呈典型的抛物线型,与段永红等<sup>[19]</sup>的结论一致。4-10 月各月及年  $ET_0$  空间分布相似,表现为东北部为大值区,西南部及安平为小值区。

(2)衡水市年参考作物蒸散量存在准 6a 的主要振荡周期,周期显著,按照其准 6a 的周期演变,可以推测 2012-2015 年衡水市的年  $ET_0$  为上升趋势;9 月主要振荡周期为 6a,周期异常显著,2、3、4、5 和 11 月

的主要振荡周期显著,依次为 5、6、6、7 和 3a。衡水市 6、8、12 月及年  $ET_0$  依次在 1993、2008–2009、1983–1984 年和 1983 年发生了气候突变,其突变发生的原因有待进一步研究。

(3)全区一致型是衡水市年及月参考作物蒸散量变化的最主要的空间模态,且其空间分布均具有很好的收敛性,其次是东北部和西南部反向变化的空间分布特征。也即衡水市年及月  $ET_0$  大多表现为全区同增加或同减少,还有时表现为东北部增加西南部减少或者东北部减少西南部增加的情形。

(4)气温日较差、最高气温、日照时数和相对湿度是影响参考作物蒸散量变化的关键气候因子,其影响的重要程度因季节不同而略有改变,前 3 个因子与  $ET_0$  呈显著正相关,第 4 个因子与其显著负相关。目前,关于影响  $ET_0$  的主要气象要素随季节变化的研究不多,研究较多的是生长季节内  $ET_0$  对气象要素的敏感性,曹雯等<sup>[20]</sup>认为西北地区生长季(4–10 月)  $ET_0$  对太阳总辐射最敏感,其次是气温和相对湿度,对风速的敏感性最低;曾丽红等<sup>[21]</sup>认为在东北地区生长季(5–9 月)气温变化(最高气温、最低气温和平均气温的影响之和)对  $ET_0$  的影响最明显,平均风速对其影响较小。衡水市全年除 12 月中旬–翌年 2 月上旬外均有作物生长,而 5–9 月的  $ET_0$  受日照时数影响最大,然后依次是气温日较差、相对湿度、最高气温、平均气温和平均风速等,与曹雯等的结论一致。风速变化不是影响参考作物蒸散量的主导因子,这与文献[17,22]关于河北省蒸发和蒸散变化的研究结论不一致,可能与海拔高度及地形有关。段永红等<sup>[19]</sup>认为海拔高度与地形变化是导致  $ET_0$  时空变化的主导因素;陈超等<sup>[16]</sup>认为日照时数是导致盆地地区  $ET_0$  减少的主要原因,风速是导致高原地区  $ET_0$  变化的主要原因。本文认为风速对衡水市  $ET_0$  影响较小,这与文献[20–21]的结论一致。

## 参考文献:

- [1] 河北省气象局. 河北省天气预报手册[M]. 北京:气象出版社,1987:10.
- [2] 张宗祜,沈照理,薛禹群. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京:地质出版社,2000:35-60.
- [3] 王道龙. 建设我国节水高效农业的战略对策[J]. 中国人口资源与环境,2001,11(3):31-35.
- [4] 邵爱军,葛之艺,刘志刚,等. 环境变化对河北省可利用水资源的影响[J]. 南水北调与水利科技,2003,1(4):33-36.
- [5] FAO. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop

- water requirements [M]. Rome: Food and Agriculture Organization,1998.
- [6] Doorenbos J, Pruitt W O. Crop water requirements [A]. Irrigation and drainage paper No. 24 (rev.) [R]. Rome: FAO,1977:144.
- [7] 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤–植物–大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京:水利电力出版社,1994:122-137.
- [8] 姚德良,朱进生,谢正桐,等. 土壤水盐运动模式研究及其在干旱区农田的应用[J]. 中国沙漠,2001,21(3):286-291.
- [9] Hidalgo H G, Cayan D R, Derringer M D. Sources of variability of evapotranspiration in California[J]. J. Hydrometeor., 2005, (6):3-18.
- [10] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. Int. J. Climatol., 2000, (20):381-396.
- [11] 刘倪,夏伟,吴晓蔚,等. 几种参考作物蒸散量计算方法的比较[J]. 河北科技大学学报,2009,30(1):17-24.
- [12] 封志明,杨艳昭,丁晓强,等. 甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究[J]. 农业工程学报,2004,20(1):99-103.
- [13] 孙小舟,封志明,杨艳昭. 西辽河流域 1952–2007 年参考作物蒸散量的变化趋势[J]. 资源科学,2009,31(3):479-484.
- [14] 张山清,普宗朝,宋良变,等. 吐鲁番地区气候变化对参考作物蒸散量的影响[J]. 中国农业气象,2009,30(4):532-537.
- [15] 普宗朝,张山清. 近 48 年新疆夏半年参考作物蒸散量时空变化[J]. 中国农业气象,2011,32(1):67-72.
- [16] 陈超,庞艳梅,潘学标,等. 四川地区参考作物蒸散量的变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国农业气象,2011,32(1):35-40.
- [17] 李春强,洪克勤,李保国. 河北省近 35 年(1965–1999 年)参考作物蒸散量的时空变化[J]. 中国农业气象,2008,29(4):414-419.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999.
- [19] 段永红,陶澎,李本纲. 北京市参考作物蒸散量的时空分布特征[J]. 中国农业气象,2004,25(2):22-25.
- [20] 曹雯,申双和,段春锋. 西北地区近 49 年生长季参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. 中国农业气象,2011,32(3):375-381.
- [21] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 东北地区参考作物蒸散量对主要气象要素的敏感性分析[J]. 中国农业气象,2010,31(1):11-18.
- [22] 安月改,李元华. 河北省近 50 年蒸发量气候变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(4):159-162.