

杨艳娟,曹经福,熊明明,等. 影响海河流域参考作物蒸散量的气象因子定量分析[J]. 干旱气象,2017,35(3):367-373. [YANG Yanjuan, CAO Jingfu, XIONG Mingming, et al. Quantitative Analysis of Climate Factors Influencing on Potential Evapotranspiration Changes over Haihe River Basin [J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(3):367-373], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0367

## 影响海河流域参考作物蒸散量的气象因子定量分析

杨艳娟<sup>1</sup>,曹经福<sup>1</sup>,熊明明<sup>1</sup>,赵玉娟<sup>2</sup>

(1. 天津市气候中心,天津 300074;2. 天津市气象信息中心,天津 300074)

**摘要:**基于海河流域159个气象站1961—2014年逐日气象资料,采用P-M模型计算该地区的参考作物蒸散量( $ET_0$ ),分析海河流域 $ET_0$ 对平均最高、最低气温及相对湿度、平均风速和日照时数的敏感性,并结合各气象要素的多年相对变化率定量探讨 $ET_0$ 变化的主导因子。结果表明:海河流域年 $ET_0$ 以 $-22.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率显著减少,在空间分布上,除流域西北部分地区呈增加趋势外,大部分地区 $ET_0$ 呈显著减少趋势。 $ET_0$ 对各要素的敏感系数除相对湿度外,其他均为正值。综合考虑 $ET_0$ 对各要素的敏感性及各要素的多年相对变化率发现,相对湿度及最高、最低气温是导致 $ET_0$ 增加的因子,平均风速和日照时数则是导致 $ET_0$ 减少的因子。虽然平均风速和日照时数的敏感系数不是最高,但其减小趋势显著,多年相对变化率较大,导致对 $ET_0$ 的贡献较大,成为海河流域 $ET_0$ 变化的主导因子,二者的显著减少造成了整个流域 $ET_0$ 显著减少的事实。

**关键词:**气候变化;Penman-Monteith模型;参考作物蒸散量;海河流域

**文章编号:**1006-7639(2017)-03-0367-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0367

**中图分类号:**P426.2

**文献标识码:**A

### 引言

参考作物蒸散量( $ET_0$ )是充分供水状态下,某一固定下垫面可能达到的最大蒸散量,是表征大气蒸散能力及评价气候干旱程度、植被耗水量、生产潜力及水资源供需平衡的重要指标之一,对于区域气候变化研究、水资源综合评价、农业灌溉、干旱监测预警、生态环境保护等领域均有重要意义<sup>[1-2]</sup>。在全球气候变暖大背景下, $ET_0$ 呈大范围减少趋势<sup>[3-6]</sup>,由于 $ET_0$ 的变化是温、湿、风、辐射等多种气象要素共同作用的结果,所以区域 $ET_0$ 增减机制首先应取决于 $ET_0$ 和各气象因子之间的关系,核心工作是考察 $ET_0$ 对各气象因子变化的敏感性<sup>[7]</sup>。研究发现,不同地区的不同气候条件使 $ET_0$ 对气象因子的敏感性具有明显的区域差异,在黄河流域、淮河流域和长江流域, $ET_0$ 对相对湿度最敏感<sup>[8-10]</sup>,在东北地区 $ET_0$ 对气温最敏感<sup>[11]</sup>,在西北地区 $ET_0$ 对太阳辐射<sup>[12]</sup>最敏感。然而,敏感性仅能表现 $ET_0$ 对气

象要素变化响应的敏感程度,不能衡量因气象要素变化导致的 $ET_0$ 的变化幅度。由于各气象要素的变化并不同步,敏感程度高的气象要素不一定会造成 $ET_0$ 的大幅变化,因此定量评估各气象因子对 $ET_0$ 变化的贡献、确定 $ET_0$ 变化的主导因子,也是很多学者一直在探索的问题,且尚存一些争议。Thomas等<sup>[1]</sup>研究中国 $ET_0$ 的时空分布特征发现, $ET_0$ 变化的主导因子区域差异明显:东北地区为最高温度,中部地区为相对湿度,西北为风速,35°N以南为日照时数。但Gao等<sup>[13]</sup>则认为 $ET_0$ 变化的主导因子在中国东北地区为相对湿度,中部和西北地区为风速,南部地区为日照时数。单独分析各个区域 $ET_0$ 变化的主导因子,结果也不尽相同<sup>[9,14-15]</sup>。目前,针对海河流域的研究多为 $ET_0$ 时空分布特征<sup>[16-18]</sup>及敏感性分析<sup>[19]</sup>,而影响 $ET_0$ 变化的气象因子定量分析(即 $ET_0$ 变化的主导因子)并不多见,尚需进一步研究。

收稿日期:2016-11-14;改回日期:2017-02-16

基金项目:干旱气象科学研究基金项目(IAM201501)资助

作者简介:杨艳娟(1979-),女,辽宁葫芦岛人,高级工程师,主要从事气候变化、气候应用相关研究. E-mail:yangyj1979@163.com

海河流域位于  $112^{\circ}\text{E}$ — $120^{\circ}\text{E}$ 、 $35^{\circ}\text{N}$ — $43^{\circ}\text{N}$  之间,总面积为  $31.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,自西向东倾斜,包括海河、滦河、徒骇马颊河等水系<sup>[19]</sup>。流域内人口密集,水资源供需矛盾比较突出,水资源短缺已成为制约海河流域经济社会可持续发展的主要因素,而流域尺度上的蒸散是流域水循环研究的重要内容。因此,本文以海河流域为研究区域,分析  $\text{ET}_0$  的变化趋势及其对各气象因子的敏感性,揭示影响海河流域  $\text{ET}_0$  变化的主导因子。该研究可全面了解海河流域  $\text{ET}_0$  的变化特征,深入理解  $\text{ET}_0$  对气候变化的响应,以为区域农业资源开发、利用及水资源优化配置提供科学参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

利用海河流域内数据较完整的 159 个国家气象站(图 1)1961—2014 年的逐日平均最高、最低气温及相对湿度、平均风速和日照时数,所有数据均来自国家气象信息中心。

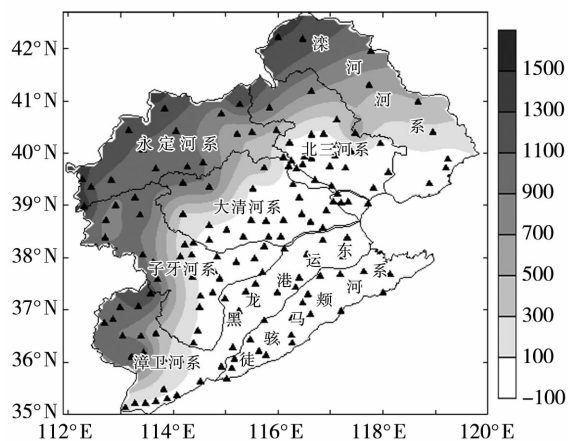


图 1 海河流域气象站点及其海拔高度(单位:m)

Fig. 1 The distribution and altitude of meteorological stations over the Haihe River basin (Unit:m)

### 1.2 方法

#### 1.2.1 Penman - Monteith 模型

$\text{ET}_0$  的计算方法应用最普遍的是 Penman - Monteith 模型(简称 P - M 模型),该模型综合了空气动力学和太阳辐射等关键因素的影响,具有很好的物理基础,仅受气象要素影响,与下垫面、土壤类型等无关,是联合国粮农组织(FAO)推荐的唯一估算模型<sup>[20]</sup>,在全球范围得到了广泛应用<sup>[1,13,21-26]</sup>。本研究利用 P - M 模型计算逐日参考作物蒸散量( $\text{ET}_0$ ),参数取值采用国家标准(GB/T20481—2006)《气象干旱等级》推荐的方法。

#### 1.2.2 气象因子的敏感系数和贡献率

敏感系数是表征一个或几个相关气象因子发生变化时,对  $\text{ET}_0$  变化影响程度的定量参数,反映  $\text{ET}_0$  对气象因子变化响应的敏感程度,有助于定量解释  $\text{ET}_0$  变化的原因。敏感系数定义为  $\text{ET}_0$  变化率与气象因子变化率之比<sup>[9,14]</sup>,其公式为:

$$S_{V_i} = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta \text{ET}_0 / \text{ET}_0}{\Delta V_i / V_i} \right) = \frac{\partial \text{ET}_0}{\partial V_i} \cdot \frac{V_i}{\text{ET}_0} \quad (1)$$

式中, $S_{V_i}$ 为敏感系数,无量纲; $\text{ET}_0$ 和 $\Delta \text{ET}_0$ 分别为参考作物蒸散量及其变化量(单位:mm); $V_i$ 和 $\Delta V_i$ 分别为气象要素及其变化量。敏感系数的优点在于无量纲性,可以在不同量纲的变量之间进行比较。敏感系数表示由气象要素变化所导致  $\text{ET}_0$  的变化,正负号表示  $\text{ET}_0$  与气象要素变化一致或相反。如敏感系数为 0.5,代表若该要素增加(或减少)10%,其他要素不变的情况下, $\text{ET}_0$  将增加(或减少)5%。

将单个气象要素的敏感系数与该要素的多年相对变化率相乘,得到由该要素引起的  $\text{ET}_0$  变化,即该要素对  $\text{ET}_0$  变化的贡献<sup>[9,14]</sup>。导致  $\text{ET}_0$  增加为正贡献,导致  $\text{ET}_0$  减小为负贡献,贡献值绝对值大的气象要素即为  $\text{ET}_0$  变化的主导因子。表达式如下:

$$\begin{cases} \text{Con}_{V_i} = S_{V_i} \cdot \text{RC}_{V_i} \\ \text{RC}_{V_i} = \frac{n \times a_{V_i}}{|\bar{V}_i|} \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\text{Con}_{V_i}$ 是气象要素  $V_i$  对  $\text{ET}_0$  变化的贡献, $\text{RC}_{V_i}$ 是  $V_i$  的多年相对变化率, $n$ 为总年数, $a_{V_i}$ 为气象要素  $V_i$  的变化趋势(由趋势分析法计算得到), $\bar{V}_i$ 为气象要素  $V_i$  的多年平均值。

## 2 参考作物蒸散量的时空分布

图 2 为 1961—2014 年海河流域  $\text{ET}_0$  的年际变化。可以看出,海河流域年均  $\text{ET}_0$  为 963.7 mm,1961 年以来  $\text{ET}_0$  呈显著减少趋势<sup>[16-17]</sup>,减少幅度达  $22.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,且通过  $\alpha=0.001$  的信度检验。1980 年代之前, $\text{ET}_0$  高于平均值的年份居多,之后低于平均值的情况较普遍。经 Mann - Kendall 突变检验(图略)发现, $\text{ET}_0$  在 1979 年出现突变点,突变前平均  $\text{ET}_0$  为 1 010.28 mm,突变后为 935.96 mm,减少 74.32 mm,1979 年后  $\text{ET}_0$  减少趋势变缓。

图 3 为 1961—2014 年海河流域年平均  $\text{ET}_0$  及其变化趋势的空间分布。可以看出海河流域各站点年平均  $\text{ET}_0$  在 779 ~ 1 090 mm 之间(图 3a),徒骇马

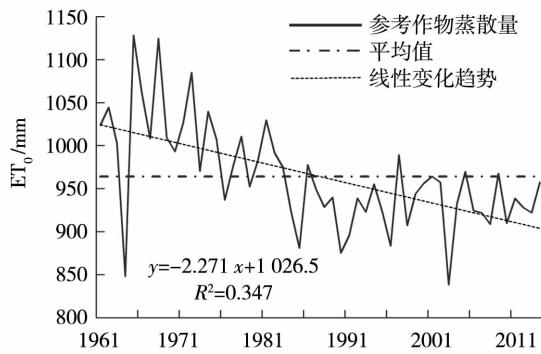


图2 1961—2014年海河流域ET<sub>0</sub>的 annual 变化  
Fig. 2 Annual variation of ET<sub>0</sub> over the Haihe River basin during 1961 - 2014

颊河系、黑龙港运东河系、子牙河系和大清河系下游地区年均ET<sub>0</sub>较大,最大值出现在沿海地区(>1 050 mm),大清河系、子牙河系北部及漳卫河系北部与滦河河系年均ET<sub>0</sub>较小,最小值出现在滦河河系北部,为800 mm左右。从ET<sub>0</sub>变化趋势的空间分布(图3b)来看,海河流域大部分地区ET<sub>0</sub>呈显著减少趋势,且其中大部分地区通过 $\alpha = 0.01$ 显著性水平检验,仅在流域西北部地区呈增加趋势(个别地区通过 $\alpha = 0.01$ 显著性水平检验),这与郭军等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。

### 3 参考作物蒸散量对气象因子的敏感性

相关系数表示在研究时段中各气象因子与ET<sub>0</sub>年际变化的一致性,相关系数绝对值大小表示ET<sub>0</sub>与相应气象因子年际变化的同步程度,而敏感系数反映ET<sub>0</sub>对气象因子年内变化的灵敏程度,其绝对值越大说明ET<sub>0</sub>对相应气象因子的变化越敏感,因此敏感系数更能直接地表现出ET<sub>0</sub>对气象因子变化响应的敏感程度。计算ET<sub>0</sub>对年平均最高、最低气温及相对湿度、平均风速和日照时数的敏感系数(表1),可以看出,在年时间尺度上,除相对湿度外,ET<sub>0</sub>对其他因子的敏感系数均为正值;相对湿度的敏感系数绝对值最大,敏感系数达-0.67,即ET<sub>0</sub>对相对湿度的变化最敏感,表明如果其他气象要素保持不变,相对湿度增加10%,ET<sub>0</sub>将会减少6.7%;其次是日照时数和最高气温,敏感系数分别为0.40和0.35,敏感性最低的是最低气温,仅为0.12。从各气象因子的变化趋势来看(表2),最高、最低气温呈增加趋势,相对湿度、日照时数和风速呈减少趋势,这种变化趋势是中国北方地区气候变化的基本特征<sup>[27]</sup>。结合敏感系数综合分析,近54 a年来,相对湿度及最高、最低气温变化是导致ET<sub>0</sub>增加的气象因子,日照时数和风速是导致ET<sub>0</sub>减少的气象因子。

图4为1961—2014年海河流域ET<sub>0</sub>对各气象

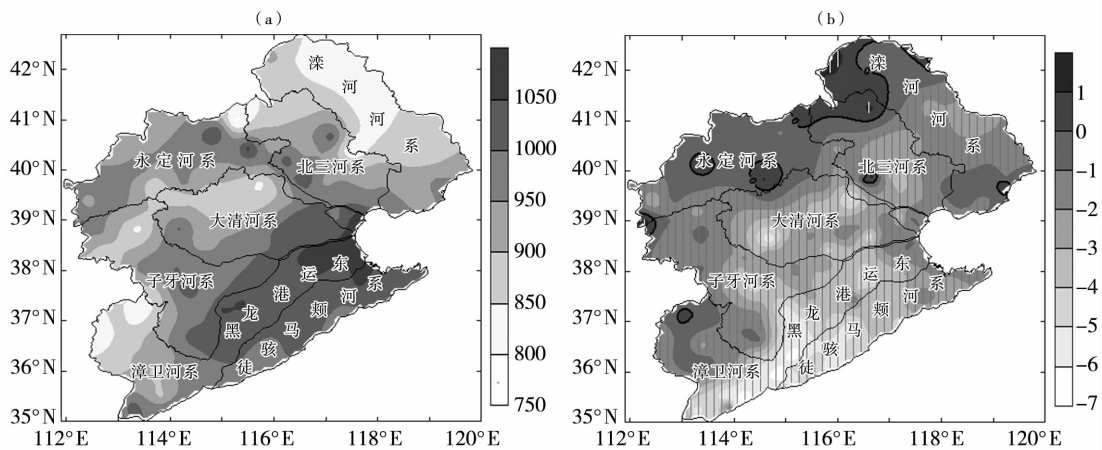


图3 1961—2014年海河流域年平均ET<sub>0</sub>(a,单位:mm)及其变化趋势(b,单位:mm·a<sup>-1</sup>)的空间分布(竖线区域为通过 $\alpha = 0.01$ 的信度检验)

Fig. 3 The spatial distribution of annual mean ET<sub>0</sub> (a, Unit:mm) and its variation trend (b, Unit:mm·a<sup>-1</sup>) over the Haihe River basin during 1961 - 2014 (Vertical lines area passed the 0.01 confidence test)

表1 1961—2014年海河流域ET<sub>0</sub>对各气象因子的敏感系数

Tab. 1 The sensitive coefficients of ET<sub>0</sub> to meteorological elements over the Haihe River basin during 1961 - 2014

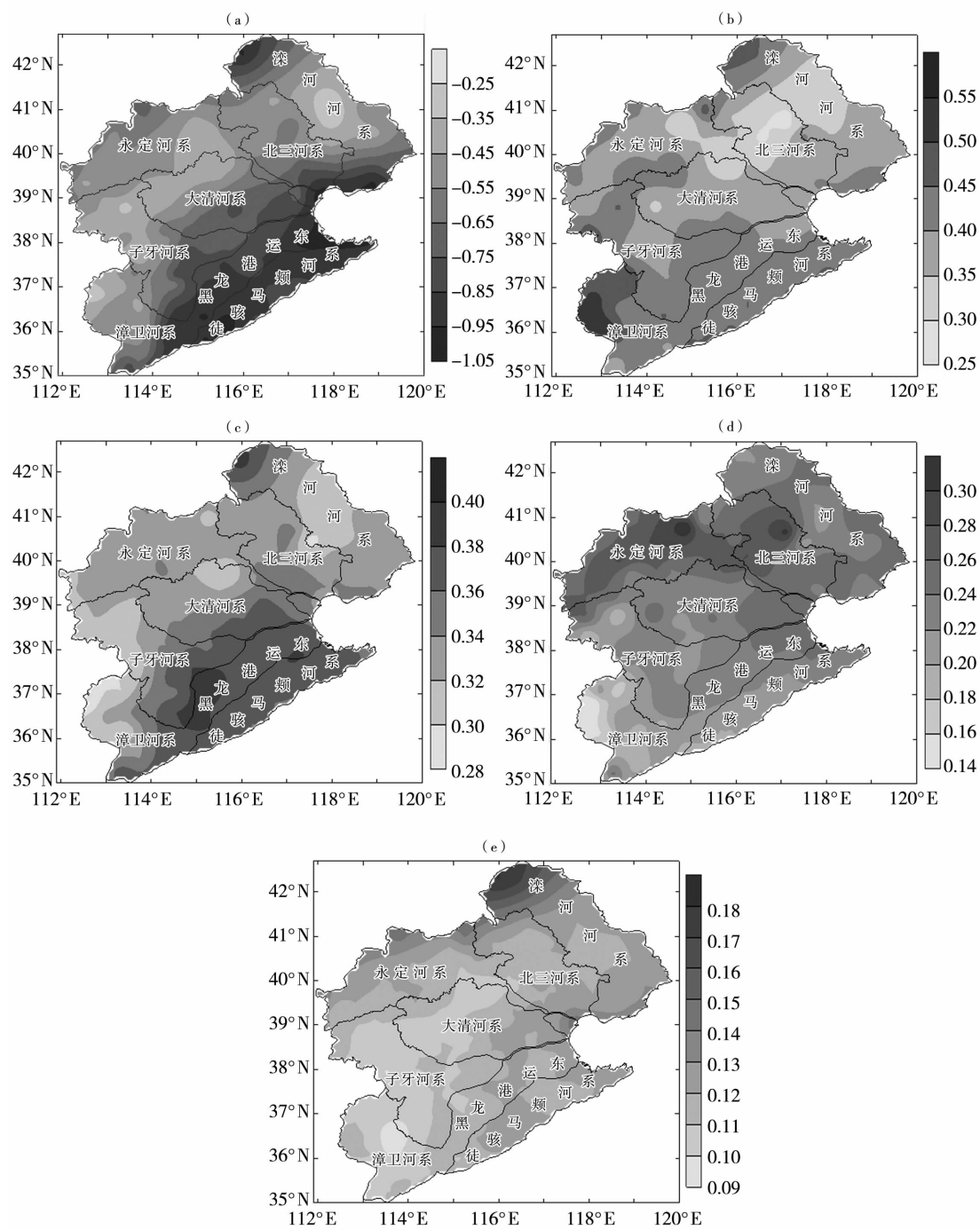
相对湿度	日照时数	最高气温	风速	最低气温
-0.67	0.40	0.35	0.23	0.12

表 2 1961—2014 年海河流域各气象因子的气候倾向率

Tab. 2 The climate tendency rate of meteorological elements over the Haihe River basin during 1961 – 2014

相对湿度/ $\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	日照时数/ $\text{h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	最高气温/ $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	最低气温/ $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
-0.31	-92.68 *	0.03	-0.21 *	0.64 *

注: \* 为通过 0.01 信度检验

图 4 1961—2014 年海河流域  $ET_0$  对各气象因子敏感系数的空间分布

(a) 相对湿度, (b) 日照, (c) 最高气温, (d) 风速, (e) 最低气温

Fig. 4 The spatial distributions of sensitive coefficients of  $ET_0$  to meteorological elements over the Haihe River basin during 1961 – 2014

(a) relative humidity, (b) sunshine duration, (c) maximum temperature, (d) wind speed, (e) minimum temperature

因子敏感系数的空间分布,可以看出,ET<sub>0</sub>对各气象因子的敏感系数存在明显的地域性。各地ET<sub>0</sub>对相对湿度变化的敏感系数均为负值(图4a),其空间分布与地形走向较为一致,呈东北—西南走向,东南部的黑龙港运东河系和徒骇马颊河系以及西北部的滦河上游小部分地区敏感系数较大,中间地区较小;日照时数的敏感系数均为正值(图4b),大值区也在东南部及西北部的滦河上游小部分地区;最高气温的敏感系数均为正值(图4c),空间分布与相对湿度较为相似;风速的敏感系数均为正值(图4d),空间分布与日照时数的敏感系数基本相反,这与刘小莽等<sup>[19]</sup>的结论基本一致,大值区位于海河流域北部,在漳卫河系存在一个小值区,其他区域相差不大。最低气温的敏感系数均为正值(图4e),整体比最高气温小,大值区集中在滦河河系的北部,其他地区均相差不大。

#### 4 影响参考作物蒸散量变化的气象因子贡献

从公式(2)可见,各气象因子对ET<sub>0</sub>变化的贡献主要由两方面决定,即ET<sub>0</sub>变化对气象因子的敏感性和气象因子自身的变化量。从各站点各气象因子的多年相对变化率(图略)来看,日照时数和风速在整个流域范围内基本呈减少趋势,且减少幅度较大。大部分地区日照时数减少超过20%,变幅最大达40%~50%;风速减小更明显,大部分地区变幅在40%以上;相对湿度以减少为主,但变幅不大,基本在±10%以内;最高气温除东南部减少外,其余地区均增加,整体变幅不大,在±10%以内;最低气温在山区略有减少,减少幅度不超过10%,平原地区均有增加,增加幅度在10%~50%之间。由于气象因子与ET<sub>0</sub>之间复杂的非线性关系,各气象因子多年相对变化率的区域差异必然会造成对ET<sub>0</sub>变化贡献的差异。

虽然ET<sub>0</sub>对相对湿度的敏感系数远高于其他因子,但因其变化趋势不明显,多年相对变化率仅为-2.93%(表3),远低于其他要素的多年相对变化率,导致该因子对ET<sub>0</sub>变化的贡献不大,仅为1.91%,说明相对湿度并不是ET<sub>0</sub>变化的主导因子;ET<sub>0</sub>对风速虽然不是最敏感,但自1961年以来,平均风速的减小趋势非常显著,多年相对变化率达-47.46%,因此综合敏感性和多年相对变化率,风速对ET<sub>0</sub>变化的贡献率达到最大,成为ET<sub>0</sub>变化的主导因子;ET<sub>0</sub>对日照时数的变化较为敏感,且日照

时数减小趋势显著,其结果是日照时数对ET<sub>0</sub>的贡献仅次于平均风速,达7.93%;最高、最低气温在敏感性和多年变化上的综合作用,决定了二者对ET<sub>0</sub>变化的贡献较低。

表3 1961—2014年海河流域各气象因子多年相对变化率及其对ET<sub>0</sub>变化的贡献率(单位:%)

Tab.3 The relative change rate of meteorological factors and the contributions of them to ET<sub>0</sub> over the Haihe River basin during 1961-2014 (Unit:%)

	相对湿度	日照时数	最高气温	风速	最低气温
变化率	-2.93	-19.91	5.37	-47.46	21.98
贡献率	1.91	-7.93	1.81	-10.83	3.79

综合考量海河流域各站各气象因子对ET<sub>0</sub>的贡献大小,图5从空间分布上给出海河流域ET<sub>0</sub>变化的主导因子。可以看出,海河流域大部分地区ET<sub>0</sub>变化的主导因子为平均风速和日照时数。其中主导因子为风速的有108个站,分布在整个海河流域,平原地区更为集中;主导因子为日照时数的有38个站点,多分布在39°N以南地区;主导因子为最低气温的有8站、相对湿度有4站、最高气温有1站,多分布在流域西北部。从前面分析可知,相对湿度及最高、最低气温是导致ET<sub>0</sub>增加的因子,日照时数和风速是导致ET<sub>0</sub>减少的因子,因此,对以日照时数和风速为主导因子的绝大部分区域来说,ET<sub>0</sub>呈显著减少趋势,以相对湿度、最高及最低气温为主导因子的流域西北部地区来说,ET<sub>0</sub>呈增加趋势。ET<sub>0</sub>变化的主导因子分布恰好与ET<sub>0</sub>变化趋势的空间分布相

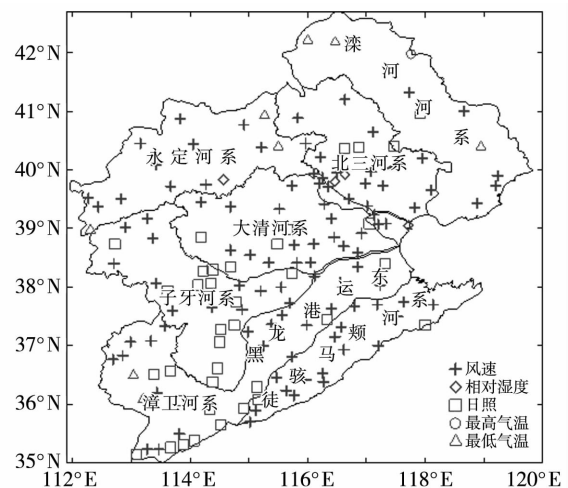


图5 1961—2014年海河流域ET<sub>0</sub>变化的主导因子  
Fig.5 The dominant climate factors of the change of ET<sub>0</sub> over the Haihe River basin during 1961-2014

吻合,表明用该方法得到的海河流域  $ET_0$  变化的主导因子比较可靠。综上所述,对海河流域大部分地区而言,风速和日照时数对  $ET_0$  变化的贡献较大,是  $ET_0$  变化的主导因子,二者的显著减少造成整个流域  $ET_0$  显著减少的事实。

## 5 结 论

(1)1961—2014 年,海河流域年均  $ET_0$  呈显著减少趋势,减少幅度达  $22.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,在 1979 年出现了突变点,突变前后  $ET_0$  相差  $74.32 \text{ mm}$ ,且突变后减少趋势变缓。海河流域各站点年均  $ET_0$  在  $779 \sim 1\,090 \text{ mm}$  之间,除流域西北部  $ET_0$  呈增加趋势外,大部分地区  $ET_0$  呈显著减少趋势。

(2) $ET_0$  对各气象要素的敏感系数除相对湿度外,其他均为正值,绝对值从大到小依次为相对湿度、日照时数、最高气温、风速、最低气温。综合考虑  $ET_0$  对各要素的敏感性及各要素的变化趋势发现,相对湿度及最高、最低气温是导致  $ET_0$  增加的因子,平均风速和日照时数则是导致  $ET_0$  减少的因子。

(3)风速和日照时数对  $ET_0$  变化的贡献率较大,最高、最低气温和相对湿度对  $ET_0$  变化的贡献较小。从空间分布来看,海河流域大部分站点  $ET_0$  变化的主导因子为平均风速和日照时数,共占全部站点的 90% 以上;主导因子为最低气温、相对湿度、最高气温的站点较少,多分布在流域西北部。因此,对海河流域大部分地区而言,风速和日照时数是  $ET_0$  变化的主导因子,二者的显著减少造成了整个流域  $ET_0$  显著减少的事实。

## 参考文献

- [1] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. *International Journal of Climatology*, 2000,20(4):381-396.
- [2] 王健,吕新,王江丽. 北疆地区参考作物蒸散量时空变化特征[J]. *干旱气象*,2015,33(1):63-69.
- [3] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等. “蒸发悖论”在中国的规律分析[J]. *水科学进展*,2008,19(2):147-152.
- [4] 张方敏,申双和. 我国参考作物蒸散的空间分布和时间趋势[J]. *南京气象学院学报*,2007,30(5):705-709.
- [5] 黄会平,曹明明,宋进喜,等. 1957—2012 年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析[J]. *自然资源学报*,2015,30(2):315-326.
- [6] 黄娟,申双和,李新建,等. 1961—2010 年中国参考作物蒸散量变化趋势与时空格局[J]. *水土保持研究*,2016,23(5):240-244.
- [7] 杨林山,李常斌,王帅兵,等. 洮河流域潜在蒸散的气候敏感性分析[J]. *农业工程学报*,2014,30(11):102-109.
- [8] 刘勤,严昌荣,赵彩霞,等. 黄河流域日潜在蒸散量变化及气象敏感要素分析[J]. *农业工程学报*,2014,30(17):157-166.
- [9] 王晓东,马晓群,许莹,等. 淮河流域参考作物蒸散量变化特征及主要气象因子的贡献分析[J]. *中国农业气象*,2013,34(6):661-667.
- [10] Gong L B, Xu C Y, Chen D L, et al. Sensitivity of the Penman - Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2006,329:620-629.
- [11] 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.
- [12] 曹雯,申双和,段春峰. 西北地区近 49 年生长期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.
- [13] Gao G, Chen D, Ren G, et al. Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China, 1956 - 2000[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2006,16(1):3-12.
- [14] 董旭光,顾伟宗,王静,等. 影响山东参考作物蒸散量变化的气象因素定量分析[J]. *自然资源学报*,2015,30(5):810-823.
- [15] 马宁,王乃昂,王鹏龙,等. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征及影响因素的定量分析[J]. *自然资源学报*,2012,27(6):975-989.
- [16] Gao G, Chong Y X, Chen D, et al. Spatial and temporal characteristics of actual evapotranspiration over Haihe River basin in China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012,26(5):655-669.
- [17] 曹永强,张亭亭,徐丹,等. 海河流域蒸发时空演变规律分析[J]. *资源科学*,2014,36(7):1489-1500.
- [18] 郭军,任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J]. *水科学进展*,2005,16(5):666-672.
- [19] 刘小莽,郑红星,刘昌明,等. 海河流域潜在蒸散的气候敏感性分析[J]. *资源科学*,2009,31(9):1470-1476.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirement - FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome:FAO, 1998:15-64.
- [21] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent climate change[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,1997,87(1):55-73.
- [22] 毛飞,张光智,徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. *应用气象学报*,2000,11(增刊):128-136.
- [23] 尹云鹤,吴绍洪,戴尔阜. 1971—2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J]. *科学通报*,2010,55(22):2226-2234.
- [24] John D V. Simplified forms for the standardized FAO - 56 Penman - Monteith reference evapotranspiration using limited weather data[J]. *Journal of Hydrology*, 2013,505:13-23.
- [25] 汪彪,曾新民,刘正奇,等. 中国西北地区参考作物蒸散量的估算与变化特征[J]. *干旱气象*,2016,34(2):243-251.
- [26] 沙比提,买买提,欢乐希,等. 1961—2014 年乌鲁木齐地区气候特征及干湿区变化[J]. *干旱气象*,2016,34(3):448-455.
- [27] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. *气候变化研究进展*,2006,2(1):3-8.

## Quantitative Analysis of Climate Factors Influencing on Potential Evapotranspiration Changes over Haihe River Basin

YANG Yanjuan<sup>1</sup>, CAO Jingfu<sup>1</sup>, XIONG Mingming<sup>1</sup>, ZHAO Yujuan<sup>2</sup>

(1. Tianjin Climate Center, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Meteorological Information Center, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** Based on the daily data of 159 meteorological stations over the Haihe River basin during 1961 – 2014, the potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) was calculated by Penman – Monteith equation to analyze the sensitivity coefficients of  $ET_0$  to meteorological elements including maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, average wind speed and sunshine duration. Additionally, the dominant factors influencing  $ET_0$  change were discussed combined with the multi – year relative variations of meteorological elements. The results show that annual mean  $ET_0$  over the Haihe River basin reduced significantly with the rate of  $22.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  from 1961 to 2014, and the mutation occurred in 1979. From the spatial distribution,  $ET_0$  reduced significantly in the most of the basin, except for the northwestern part. The sensitive coefficients of  $ET_0$  to meteorological elements were almost positive, except for relative humidity. Considering the sensitive coefficients of  $ET_0$  to meteorological elements and the multi – year relative variations of each element, the relative humidity and the maximum, minimum temperature were the factors causing the increase of  $ET_0$ , the average wind speed and sunshine duration were the factors causing the decrease of  $ET_0$ . The sensitive coefficients of  $ET_0$  to average wind speed and sunshine duration were not the highest, but the average wind speed and sunshine duration decreased significantly and their relative variations were larger, so they contributed great to  $ET_0$  and became the dominant factors of  $ET_0$  change. To summarize,  $ET_0$  decreased significantly due to the decreasing of average wind speed and sunshine duration over the Haihe River basin.

**Key words:** climate change; Penman – Monteith; potential evapotranspiration; Haihe River basin