

# 京津冀地区潜在蒸散量时空演变特征及归因分析

毕彦杰<sup>1,2</sup>, 赵 晶<sup>1,2</sup>, 赵 勇<sup>2\*</sup>, 肖伟华<sup>2</sup>, 孟凡锦<sup>1</sup>

(1.华北水利水电大学 水资源学院, 郑州 450046;

2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 为了深入认识京津冀地区潜在蒸散量的时空变化特征及其对气候变化的响应, 该研究基于京津冀地区 23 个气象站 57 a 逐日气象观测资料, 应用 Penman-Monteith 公式计算各站点日潜在蒸散量 ( $ET_0$ ), 剖析  $ET_0$  的时空变化特征, 运用敏感性分析法定量研究  $ET_0$  对各气象要素的敏感性及其时空变化特征, 定量识别各气象要素变化对  $ET_0$  变化的贡献。研究表明: 1) 京津冀地区  $ET_0$  空间分布整体呈由南向北递减趋势 (除中部地区的塘沽站、黄骅站与保定站点  $ET_0$  较高外)。  $ET_0$  整体呈下降趋势, 线性趋势率为  $-0.92 \text{ mm/a}$ 。  $ET_0$  变化趋势空间分布由西北向东南递减, 以春季减幅最为明显。 2) 京津冀地区  $ET_0$  对相对湿度的最为敏感 ( $-0.44$ ), 其次为风速 ( $0.31$ )、日照时数 ( $0.28$ ) 与平均气温 ( $0.26$ )。 随时间推移,  $ET_0$  对平均风速与相对湿度敏感性整体呈下降趋势, 而  $ET_0$  对平均气温与日照时数的敏感性逐渐增强。敏感性系数空间分布从西北到东南: 风速与平均气温敏感性系数逐渐递增, 而日照时数与相对湿度敏感性系数逐渐递减。 3) 风速变化对京津冀地区  $ET_0$  变化的贡献最大, 平均气温次之。 风速为主导因素的站点个数随时间呈下降趋势, 平均气温与日照时数为主导的站点个数随时间呈上升趋势, 说明近年来平均气温与日照时数对潜在蒸散量变化的影响愈加明显, 这可能是由于近年来京津冀地区雾霾尤其是冬季雾霾对日照时数、气温与风速的产生一定影响, 进而影响  $ET_0$ 。

**关键词:** 蒸腾; 蒸发; 潜在蒸散量; 时空变化; 敏感性分析; 贡献率; 气候变化; 京津冀

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.015

中图分类号: P426.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0130-11

毕彦杰, 赵 晶, 赵 勇, 肖伟华, 孟凡锦. 京津冀地区潜在蒸散量时空演变特征及归因分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 130—140. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.015 http://www.tcsae.org

Bi Yanjie, Zhao Jing, Zhao Yong, Xiao Weihua, Meng Fanjin. Spatial-temporal variation characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 130 — 140. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.015 http://www.tcsae.org

## 0 引言

潜在蒸散量 ( $ET_0$ ) 是指大片而均匀的自然表面在足够湿润条件下水体保持充分供应时的蒸散量, 是可能蒸发量或大气蒸发能力, 是连接地表水循环和能量循环的纽带, 是热量平衡和水分平衡的重要组成部分<sup>[1]</sup>。参考作物蒸散量是在潜在蒸散量的基础上对作物特性进行了进一步的规定, 将其定义为作物高度为 0.12 m, 叶面阻力为 70 s/m, 反射率为 0.23, 具有同一高度、水分适中、生长活跃和完全覆盖地表的绿草冠层的蒸散量, 是各种作物需水量估算、陆地水文循环和农田水分管理的基础参数, 对区域农业水管理意义重大<sup>[2]</sup>。在全球变暖的大背景下, 近 60 a 来世界各地的潜在蒸散量 (包括蒸发皿观测) 却大多呈下降趋势<sup>[3-4]</sup>。国内外学者对潜在蒸散量减少的原因持有不同观点, 认为各类气象要素: 气温、风速、

日照时数、湿度以及太阳辐射等气象要素的变化都会导致潜在蒸散量的变化<sup>[5-7]</sup>。Stanhill 等<sup>[8]</sup>认为日照时数减少造成潜在蒸散量减少的主要原因。文献[9-11]认为太阳辐射量减少是造成潜在蒸散量减少的主要原因。文献[6,12-15]认为相对湿度增加是造成潜在蒸散量减少的主要原因。Burn 等<sup>[16]</sup>认为风速和相对湿度变化是引起加拿大大草原潜在蒸散量下降的主要原因, 文献[17-19]认为风速是  $ET_0$  变化的主导因子。文献[20-23]认为川中丘陵区  $ET_0$  的变化主要是由于日照时数和风速减少引起的。曾丽红等<sup>[24]</sup>认为东北地区  $ET_0$  变化主要是气温变化造成的。目前, 国内外关于气候变化对  $ET_0$  变化的影响研究已经取得了大量研究成果, 但大多使用传统的趋势分析法、相关分析法等对  $ET_0$  变化开展归因分析, 也有学者应用敏感性分析法定量剖析  $ET_0$  对气象要素变化的敏感性<sup>[22,25-29]</sup>, 但不同地区的气候特点不同, 潜在蒸散量也不相同, 潜在蒸发量对各气象要素的敏感性与各气象要素变化对潜在蒸发量变化的贡献率也不同, 京津冀地区 60 a 来气候发生了显著变化, 引起潜在蒸发量也发生了显著变化<sup>[30]</sup>, 但针对  $ET_0$  对各类气象要素的敏感性与各类气象要素变化对  $ET_0$  变化的贡献率, 及其时空分布特征的定量分析还有待于进一步深入研究。

京津冀地区地处  $113^{\circ}04' \sim 119^{\circ}53'E$ 、 $36^{\circ}01' \sim$

收稿日期: 2019-07-13 修订日期: 2020-02-12

基金项目: 国家重点研发 (2016YFC0401407, 2017YFC0405805-03); 华北水利水电大学高层次人才科研基金 (201702016)

作者简介: 毕彦杰, 讲师, 博士。主要从事流域水循环模拟与实验、气候变化方面研究。Email: 835938470@qq.com

\*通信作者: 赵 勇, 教高, 博士, 主要从事水文水资源研究。

Email: zhaoyong@iwhr.com

42°37'N, 地势自西北向东南倾斜。属于温带大陆季风气候区, 四季分明, 夏季高温多雨、冬季寒冷干燥, 年平均气温为 10~14 °C。多年平均降雨量 507 mm, 降水量时空分布不均, 全年日照时数为 2 000~2 900 h, 无霜期大于 200 d, 近 44 a 平均蒸发皿蒸发量为 1 713 mm<sup>[31]</sup>。京津冀地区是中国北方经济规模最大、最具活力的地区, 同时也是中国缺水最严重、用水竞争最强烈的地区, 以不足全国 0.7% 的水资源, 承载着全国约 8% 的人口、6% 的粮食生产和 10% 的 GDP<sup>[32]</sup>。京津冀地区自古以来就是中国重要的农业生产区域, 河北平原区土层深厚且土壤肥沃, 是京津冀地区农作物主要种植区, 该区域约占京津冀地区总面积的 44% 左右, 京津冀农业灌溉用水需求量大。京津冀地区蒸散量受各类气象要素、季节、纬度、地理位置等影响, 具有明显时空变化特征, 研究该地区 ET<sub>0</sub> 变化及其时空变化特征对农业灌溉与生产十分重要。目前对京津冀地区 ET<sub>0</sub> 时空变化特征及成因虽已有相关研究, 但关于 ET<sub>0</sub> 对各类气象要素的敏感性及各气象要素变化对 ET<sub>0</sub> 变化的贡献率仍需要进一步深入定量研究。本文采用 1998 年联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization of United Nations, FAO) 最新推荐的 Penman-Monteith 公式计算了京津冀地区日 ET<sub>0</sub>, 基于 Mann-Kendal (MK) 趋势法与 Arcgis 研究 ET<sub>0</sub> 的时空变化特征, 计算 ET<sub>0</sub> 对平均气温、风速、日照时数和相对湿度的敏感性, 剖析其时空分布特征, 并量化各类气象要素变化对 ET<sub>0</sub> 变化的贡献率及其空间分布特征, 为京津冀地区变化环境对水循环的影响、农业需水预测、农业灌溉管理和水资源优化配置研究提供基础参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

选用数据为京津冀地区 23 个气象站点 (图 1) 1960 年 1 月—2016 年 12 月逐日气象数据资料, 数据来源于国家气象信息中心。数据包括日平均气温、日平均最高气温、日平均最低气温、日平均相对湿度、日平均风速、日平均日照时数。某些站点个别时期数据缺失采用相邻站点的平均值代替。气象资料空间插值的方法在通过多种插值方法进行精确度分析对比后采用反距离权重法。

### 1.2 Penman-Monteith 公式

对蒸散量的研究中, 基于表面阻力的 Penman-Monteith 公式被认为是计算潜在蒸散量较精确的方法之一<sup>[33]</sup>, 该方法仅受当地气候条件、海拔的影响, 应用范围较为广泛<sup>[34]</sup>。本文采用 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散量:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中 ET<sub>0</sub> 为潜在蒸散量, mm/d; R<sub>n</sub> 为作物表面净辐射量, MJ/(m<sup>2</sup>·d); G 为土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d); Δ 为饱和水汽压与气温关系曲线的斜率, kPa/°C; γ 为湿度计常数, kPa/°C; T<sub>mean</sub> 为空气平均气温, °C; U<sub>2</sub> 在地面以上 2 m

高处的风速, m/s; e<sub>s</sub> 为空气饱和水汽压, kPa; e<sub>a</sub> 为实际饱和水汽压, kPa。

$$R_n = (1 - \alpha) \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a - \left( \frac{T_{max,k}^4 - T_{min,k}^4}{2} \right) (0.56 - 0.08\sqrt{e_a}) \left( 0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

式中 R<sub>a</sub> 为大气顶层的太阳辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d); N 为最大日照时数, h; n 为实际日照数, h; δ 为波尔兹曼常数, 4.903×10<sup>-9</sup> MJ/(k<sup>4</sup>·m<sup>2</sup>·d); T<sub>max,k</sub> 为最高绝对气温, K; T<sub>min,k</sub> 为最低绝对气温, K; a<sub>s</sub> 为云全部遮盖下 (n=0) 大气外界辐射到达地面的分量; b<sub>s</sub> 为晴天 (n=N) 大气外界辐射到达地面的分量; α 为地表反射度, 取值 0.23。

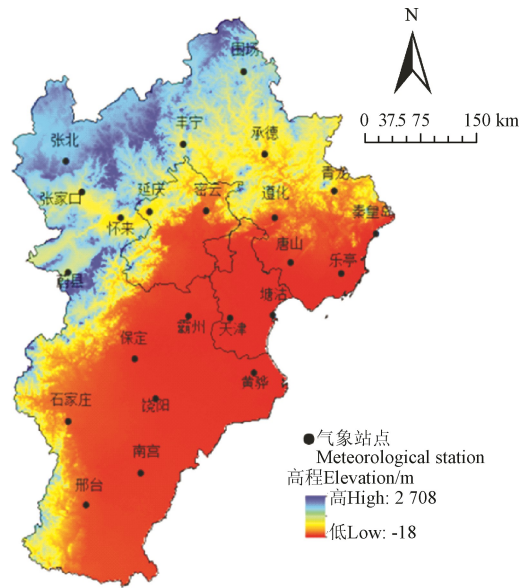


图 1 京津冀地区气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Beijing-Tianjin-Hebei region

### 1.3 Mann-Kendal 趋势检验

Mann-Kendall (MK) 非参数统计方法是应用于水文、气象序列的趋势、突变分析的一种很成熟的方法, 能有效区分某一自然过程是处于自然波动还是存在确定的变化趋势<sup>[35]</sup>, 已获得世界气象组织的力荐。

对于时间序列 X, 定义 Mann-Kendall 趋势检验的统计量 S:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

式中 x<sub>j</sub> 与 x<sub>i</sub> 为时间序列 X 的第 j、i 个数据值; n 为数据样本的长度。

sgn 定义如下:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 θ 为 x<sub>j</sub> 减去 x<sub>i</sub>。对于气象数据, 当 n ≥ 30 时, 统计量 S 大致地服从正态分布, 其均值为 0, 方差为

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

标准化统计量, 按照如下公式计算:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & s > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & s < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_j - x_i}{j-1} \right) \quad (7)$$

式中  $1 < i < j < n$ ,  $Z_c$  服从标准正态分布, 当  $Z \geq Z_{(1-\alpha)/2}$  时, 则原假设被拒绝, 说明在给定的置信水平上, 序列变化的趋势显著。 $\beta$  为衡量趋势大小的指标, 正值表示趋势为上升, 负值表示趋势为下降。

#### 1.4 敏感性与贡献率计算

敏感性系数由 McCuen<sup>[36]</sup>首先提出, 利用  $\text{ET}_0$  对各气象要素求偏导数, 即  $\text{ET}_0$  的相对变化量与单个气象要素相对变化量之比, 具体计算方法:

$$Sv_i = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta \text{ET}_0}{\Delta v_i} \cdot \frac{\text{ET}_0}{v_i} \right) = \frac{\partial \text{ET}_0}{\partial v_i} \cdot \frac{v_i}{\text{ET}_0} \quad (8)$$

式中  $v_i$  代表气象要素,  $Sv_i$  代表相应气象要素的敏感性系数。 $Sv_i$  的正负反映了  $\text{ET}_0$  与气象要素的相关性, 敏感性系数为正表明气象要素与  $\text{ET}_0$  呈正相关; 敏感性系数为负则表明气象要素与  $\text{ET}_0$  呈负相关。绝对值的大小则反映了气象要素对  $\text{ET}_0$  的影响大小, 绝对值越大, 气象要素对  $\text{ET}_0$  的影响也越大<sup>[12]</sup>。敏感性系数将  $\text{ET}_0$  的变化无量纲化, 使比较  $\text{ET}_0$  对单个气象要素的敏感性变得简单可行, 敏感性系数已成为判断气象要素对  $\text{ET}_0$  扰动的有效方法, 并得到广泛应用<sup>[3,12,14,37]</sup>。

气象要素  $v_i$  的相对变化与其敏感性系数  $Sv_i$  的乘积则可表示该要素变化导致的  $\text{ET}_0$  相对变化  $Gv_i$ , 即

$$Gv_i = \frac{\Delta v_i}{\bar{v}_i} \cdot Sv_i \quad (9)$$

式中  $\Delta v_i$  为研究时间段内气象要素  $v_i$  的变化量,  $\bar{v}_i$  为气象要素在相应时间内平均值的绝对值,  $\Delta v_i$  与  $\bar{v}_i$  之比即为  $v_i$  的相对变化。 $Gv_i$  绝对值愈大, 意味  $v_i$  相对变化所导致的  $\text{ET}_0$  变化的贡献愈大,  $Gv_i$  绝对值最大者即为  $\text{ET}_0$  变化的主导因素。

实际  $\text{ET}_0$  相对变化量应近似等于所有气象要素引起的其相对变化之和<sup>[16]</sup>, 即

$$\frac{\Delta \text{ET}_0}{\text{ET}_0} \approx \sum_{i=1}^n Gv_i \quad (10)$$

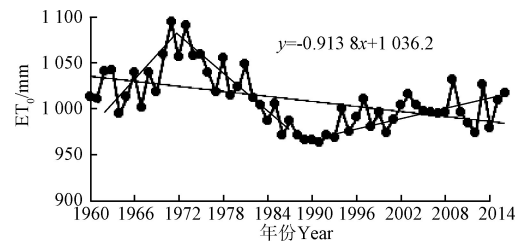
本文主要选择平均气温 (T)、相对湿度 (RH)、平均风速 (U2) 和日照时数 (SD) 4 个气象要素分析其变化对  $\text{ET}_0$  变化的贡献。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\text{ET}_0$ 时空变化特征

#### 2.1.1 $\text{ET}_0$ 年际变化

近 57 a 来, 京津冀地区  $\text{ET}_0$  整体呈下降趋势, 线性趋势率为  $-0.92 \text{ mm/a}$ 。全区  $\text{ET}_0$  在 20 世纪 60—70 年代初期呈上升趋势, 线性趋势率为  $5.1 \text{ mm/a}$ , 1970 年以后呈下降趋势 (图 2), 线性趋势率为  $-5.69 \text{ mm/a}$ , 1991 年以后呈上升趋势, 线性趋势率为  $0.46 \text{ mm/a}$ 。根据 Han 等<sup>[30]</sup>的研究, 1991 年为  $\text{ET}_0$  变化的突变点, 与本文的研究结论一致。



注: 1960—1970 年、1971—1990 年、1991—2016 年  $\text{ET}_0$  变化趋势线性方程分别为:  $y=5.108x+1008.6$ ,  $y=-5.6935x+1076.4$ ,  $y=0.4613x+1000.9$ 。

Note: Trend linear equation of 1960—1970, 1971—1990, 1991—2016 respectively was  $y=5.108x+1008.6$ ,  $y=-5.6935x+1076.4$ ,  $y=0.4613x+1000.9$ .

图 2 1960—2016 年京津冀地区年  $\text{ET}_0$

Fig.2 Annual  $\text{ET}_0$  of Beijing-Tianjin-Hebei region from 1960 to 2016

#### 2.1.2 $\text{ET}_0$ 空间变化

图 3a 显示了京津冀地区  $\text{ET}_0$  空间分布情况, 除中部地区的塘沽站、黄骅站与保定站点  $\text{ET}_0$  值较高外, 整体呈南向北递减趋势。中部的塘沽、黄骅  $\text{ET}_0$  在  $1150 \sim 1350 \text{ mm}$  之间, 北部的承德、丰宁与围场  $\text{ET}_0$  在  $450 \sim 800 \text{ mm}$  之间。

图 3b 显示了京津冀地区  $\text{ET}_0$  变化趋势的空间分布情况, 由西北向东南递减, 京津冀地区西北部的张北、蔚县与丰宁站  $\text{ET}_0$  呈上升趋势, 东部 (秦皇岛、唐山)  $\text{ET}_0$  呈下降趋势, 南部石家庄、邯郸、衡水、邢台等地也呈下降趋势。 $\text{ET}_0$  上升的站点仅有 4 个 (占 17%), 其中 3 个站点达到了 99% 的显著性水平, 1 个站点未达到显著性水平。19 个站点  $\text{ET}_0$  呈下降趋势, 其中 8 个站点通过信度 99% 的显著性检验 (42%), 5 个通过信度 95% 的显著性检验 (26%), 1 个站点通过信度 90% 的显著性检验 (6%), 5 个站点信度没有通过显著性检验 (26%), 全年  $\text{ET}_0$  的 MK 变化趋势接近 48% 的站点通过信度 99% 的显著性检验, 26% 的站点没有通过显著性检验, 全年  $\text{ET}_0$  变化显著。

#### 2.1.3 不同季节 $\text{ET}_0$ 时空变化

京津冀地区四季  $\text{ET}_0$  均呈由北向南递增趋势 (除中部地区的塘沽站、黄骅站与保定站点  $\text{ET}_0$  较高外), 春夏两季北部的围场、丰宁与承德站的  $\text{ET}_0$  占明显低于其他地区, 东南部塘沽、黄骅与保定站明显高于其他地区。秋冬两季的  $\text{ET}_0$  北部的围场、丰宁、承德与张北站处于低值区, 而东南部塘沽、黄骅与保定站处于高值区。夏季  $\text{ET}_0$  对全年贡献量达到 34.7%, 春季  $\text{ET}_0$  对全年贡献量达到 31.0%, 秋冬两季  $\text{ET}_0$  对全年贡献量分别为 22.1% 与 12.2%。

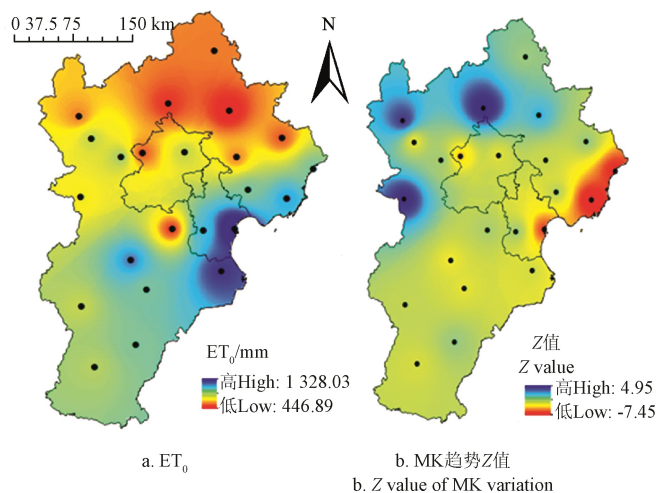


图3 京津冀地区  $ET_0$  与 MK 趋势 Z 值变化趋势空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of  $ET_0$  and Z value of MK variation trend in Beijing-Tianjin-Hebei region

春季  $ET_0$  变化趋势呈现从西北部向东南部递减趋减 (图 4a), 其中有 4 个站点 (张北、蔚县、丰宁、承德) 呈上升趋势, 19 个站点呈下降趋势, 春季  $ET_0$  MK 变化趋势接近 50% 的站点通过信度 99% 的显著性检验, 仅 17% 的站点没有通过显著性检验。夏季、秋季与春季  $ET_0$  的 MK 变化趋势也基本呈现从西北部向东南部递增趋势 (图 4b、4c、4d)。夏季  $ET_0$  有 6 个站点 MK 变化趋势呈上升趋势, 17 个站点呈下降趋势, 30% 的站点通过信度 99% 的显著性检验, 30% 的站点没有通过显著性检验。秋季  $ET_0$  有 4 个站点 MK 变化趋势呈上升趋势, 19 个站点呈下降趋势, 35% 的站点通过信度 99% 的显著性检验, 30% 的站点没有通过显著性检验。冬季  $ET_0$  有 8 个站点 MK 变化趋势呈上升趋势, 15 个站点呈下降趋势, 30% 的站点通过信度 99% 的显著性检验, 52% 的站点没有通过显著性检验。整体上: 四季  $ET_0$  下降的显著性为春季>秋季>夏季>冬季。

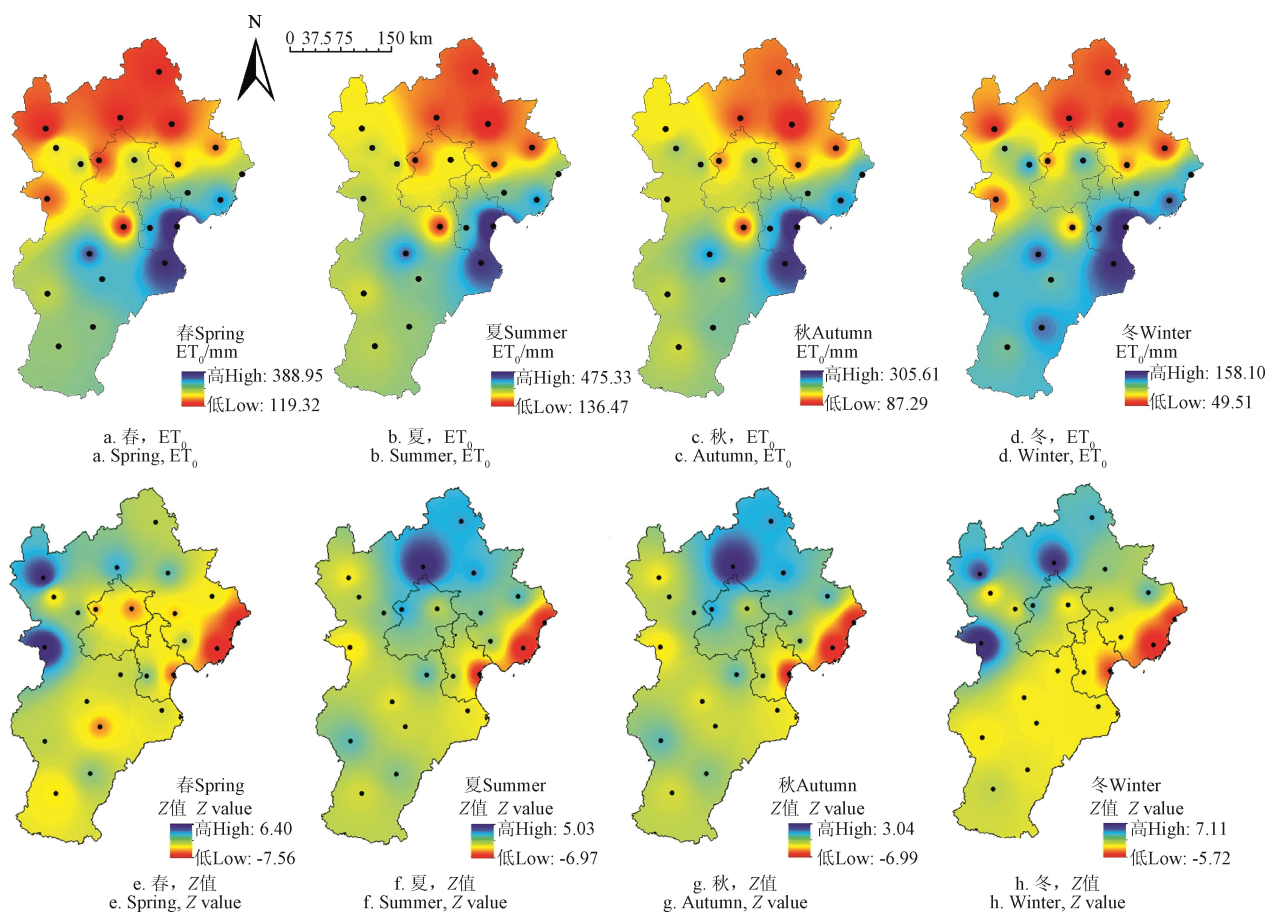


图4 京津冀四季  $ET_0$  及其 MK 变化趋势 Z 值空间分布  
Fig.4 Spatial distribution of  $ET_0$  and Z value of MK variation trend of four seasons in Beijing-Tianjin-Hebei region

#### 2.1.4 $ET_0$ 月尺度时空变化

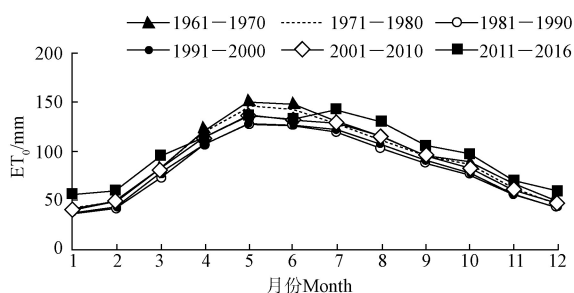
由图 5 可以看出, 5 月份的蒸发量最多, 占全年的比例最大 (12.7%), 其次为 6、7、8、4 与 9 月, 这 6 个月蒸发占全年的 2/3。对比各时段月  $ET_0$ , 月  $ET_0$  峰值随时间右移 (图 5), 近年来 5 月  $ET_0$  呈下降趋势, 6 与 7 月的  $ET_0$  呈上升趋势, 而且 11、12、1 与 2 月寒冷月份的

$ET_0$  也呈上升趋势。

1—12 月  $ET_0$  空间分布特征与年、季节  $ET_0$  分布特征类似, 均呈由西北向东南递增趋势。12、1、2、3 月, 北部的围场、丰宁、承德与张北站明显低于其他地区, 东南部塘沽、黄骅与保定站明显高于其他地区, 南部的石家庄、保定与衡水站较其他月份相比也明显处于高值



区。4—6 月北部的张北、围场、丰宁、承德、延庆站明显低于其他地区,  $ET_0$  高值区分布与 1—3 月类似。7—11 月, 北部的围场、丰宁、承德、延庆站明显低于其他地区,  $ET_0$  高值区分布与 1—3 月类似。



注: 时段划分依据文献[22, 38]。

Note: Period division based on literature [22, 38]

图 5 各时段京津冀月  $ET_0$

Fig.5 Monthly  $ET_0$  in Beijing-Tianjin-Hebei region at different periods

## 2.2 $ET_0$ 对气象要素变化的敏感性分析

根据式(8)计算  $ET_0$  对平均气温、日照时数、相对湿度和风速变化的敏感性系数, 分别为 0.26、0.28、0.31 与 -0.44。相对湿度敏感性系数的绝对值最大, 其次是风速和日照时数, 平均气温敏感性系数最小, 说明京津冀地区  $ET_0$  对相对湿度的变化最为敏感, 这与文献[6,13-15]的研究结论一致。

### 2.2.1 敏感性年际变化

$ET_0$  对各气象要素的敏感性系数都呈波动式变化趋势(图 6)。从年尺度上看, 平均气温与相对湿度敏感性系数呈缓慢上升趋势, 线性趋势率分别为 0.001 1 与 0.000 8/a, 风速与日照时数呈现下降趋势, 线性趋势率分别为 -0.003 与 0.003 2/a, 表明  $ET_0$  对平均气温的正敏感性逐渐增强, 对风速与日照时数的正敏感性整体呈下降趋势, 而对相对湿度的负敏感性也有所减弱, 这与文献[38]的研究结论一致。

从年际变化来看, 平均气温、日照时数、风速、相

对湿度敏感性系数的年际变化方差分别为  $5.5 \times 10^{-2}$ ,  $1.1 \times 10^{-2}$ ,  $9.2 \times 10^{-2}$ ,  $7.1 \times 10^{-2}$ , 表明全区各气象要素的敏感性系数的离散程度均比较大, 年际变化较大。

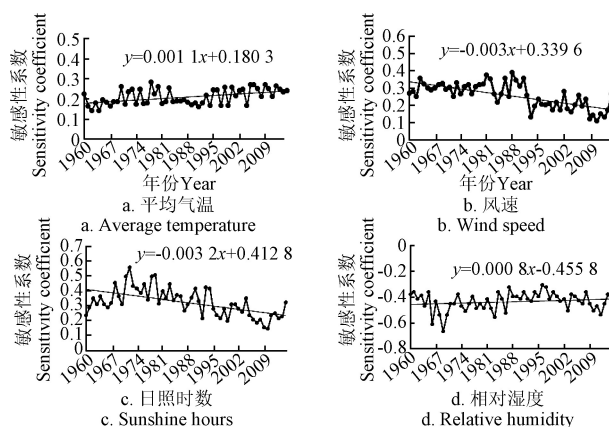


图 6 1960—2016 年  $ET_0$  对气象要素的敏感性系数

Fig.6 Sensitivity coefficient of  $ET_0$  to meteorological factors from 1960 to 2016

### 2.2.2 敏感性空间变化

京津冀地区  $ET_0$  对各气象要素的敏感性系数存在明显的地域性。风速敏感性系数表现由西北向东南部逐渐递增, 其中霸州敏感性系数大于 0.42, 而张北不足 0.25。日照时数敏感性系数表现由北部的围场、西北的张北与蔚县向东南部逐渐递减, 张北敏感性系数大于 0.5, 而天津与天津周围的站点较低, 不足 0.22。相对湿度的敏感性系数总体从西北向东南部逐渐递减, 与高程有一定的相关性, 其中黄骅敏感性系数绝对值大于 0.69, 而张北敏感性系数绝对值不足 0.33。平均气温敏感性系数表现由西北向东南部逐渐递增, 其中邢台敏感性系数大于 0.41, 而围场不足 0.16。对比图 7 可以看出, 相对湿度与平均气温敏感性空间分布特征呈相反现象, 即气温高敏感的站点属于相对湿度的低敏感区。日照时数与风速敏感性整体也呈现相反现象, 即日照时数高敏感性的站点属于平均风速低敏感区。

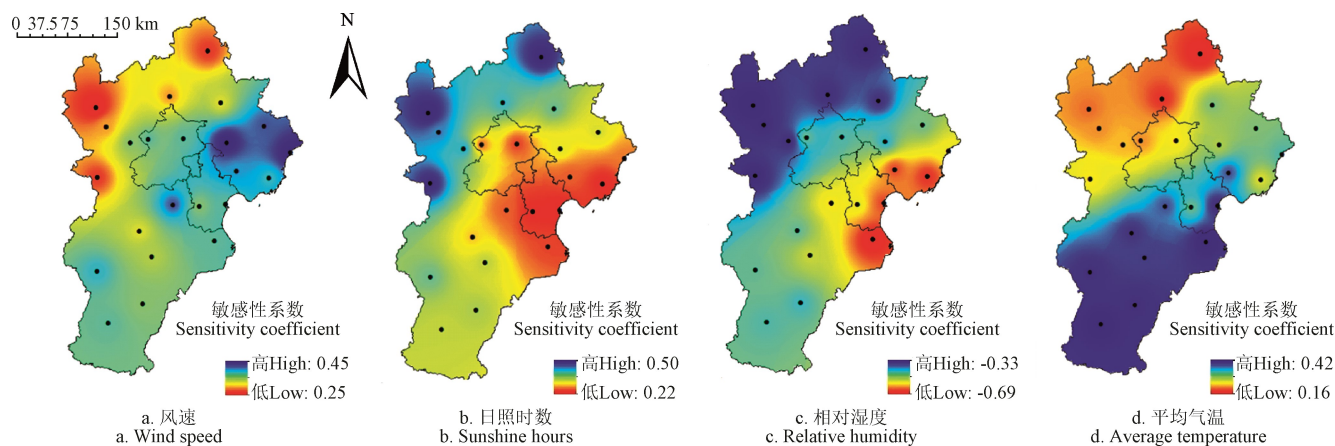


图 7  $ET_0$  对气象要素敏感性系数空间分布

Fig.7 Spatial distribution of sensitivity coefficient of  $ET_0$  to meteorological factors

2.3 气象要素贡献率分析

2.3.1 气象要素贡献率年代际变化

应用式(9)计算得到各气象要素变化对ET<sub>0</sub>变化的贡献率,可以进一步分析气象要素变化对ET<sub>0</sub>变化的影响程度,分析ET<sub>0</sub>变化的主导因素。

由表1可以看出,气象要素变化的总贡献率与ET<sub>0</sub>的相对变化率接近,各时段气象要素的总贡献率相对ET<sub>0</sub>相对变化率的误差均在±2.7%以内。总体来说,1960—2013年ET<sub>0</sub>变化的主导因素是风速,2014—2016年ET<sub>0</sub>变化的主导因素是平均气温。结合敏感性系数来看,主导因素的变化与敏感性系数的格局并不对应,这是因为气象要素变化对ET<sub>0</sub>变化的贡献率取决于敏感性系数和气象要素相对变化率2方面。1960—2013年期间风速为主导因素,这与文献[30,39]的研究结论一致。京津冀地区

风速下降趋势为每10 a下降0.05 m/s,以1970 s相对于1960 s的变化为例,1970 s平均风速较1960 s平均风速下降了2.2%,引起ET<sub>0</sub>下降1.00%,相对湿度虽然敏感性最大,但其变化幅度很小(0.35%),故相对湿度下降引起ET<sub>0</sub>上升0.19%,此外日照时数减少引起ET<sub>0</sub>减少0.66%,平均气温上升引起ET<sub>0</sub>增加0.04%,4类气象因素变化对ET<sub>0</sub>减少的总贡献率为1.43%,实际ET<sub>0</sub>突变前后减少了1.46%,误差2.1%。2014—2016相对于2011—2013 ET<sub>0</sub>变化的主导因素为平均气温(表1),平均气温上升6.0%,引起ET<sub>0</sub>上升1.50%,而日照时数增多引起ET<sub>0</sub>上升0.80%,风速下降引起ET<sub>0</sub>减少0.84%,相对湿度增加引起ET<sub>0</sub>减少0.44%。对比各时段气象要素变化对ET<sub>0</sub>变化的贡献率,平均气温与日照时数的贡献率呈逐渐上升趋势。

表1 各时段气象要素变化对ET<sub>0</sub>变化的贡献率

Table 1 Contribution rate of meteorological elements changes to ET<sub>0</sub> change in each period

时段 Period	各气象要素变化对ET <sub>0</sub> 变化的贡献 Contribution of meteorological elements changes to ET <sub>0</sub> chances/%				总贡献 Total contribution/%	ET <sub>0</sub> 相对变化 Relative changes of ET <sub>0</sub> /%	主导因素 Dominant factor
	平均气温 Average temperature	日照时数 Sunshine hours	风速 Wind speed	相对湿度 Relative humidity			
1960s—1970s	0.04	-0.66	-1.00	0.19	-1.43	-1.46	风速
1970s—1980s	0.29	-0.35	-5.40	-0.69	-6.14	-6.16	风速
1980s—1990s	0.94	-0.85	-1.90	0.10	-1.71	-1.72	风速
1990s—2000s	0.73	-1.03	1.75	-0.55	0.89	0.90	风速
2000s—2010s	-0.97	-0.14	3.52	0.11	2.50	2.55	风速
2011*—2014*	1.50	0.80	-0.84	-0.44	1.02	1.05	平均气温

注：1960s—1970s为1971—1980年的10 a平均值相对于1961—1970年代11 a平均值的变化率，以此类推；2011\*—2016\*为2014—2016年3 a平均值相对于2011—2013年3 a平均值的变化率。下同。

Note: The 1960s—1970s is the 10-year average change rate of ET<sub>0</sub> in 1971—1980 relative to 1961—1970s, and so on. 2011\*—2014\* is the 3-year average change rate of ET<sub>0</sub> in 2014—2016 relative to 2011—2013. The same below.

2.3.2 气象要素贡献率时空变化

各时段京津冀地区气象要素变化对ET<sub>0</sub>变化贡献率的空间分布情景见图8。

1970 s ET<sub>0</sub>相对于1960 s变化：京津冀西部的张北站ET<sub>0</sub>变化的主导因素是平均气温，中部的霸州站ET<sub>0</sub>变化的主导因素是日照时数，其余的21个站点ET<sub>0</sub>变化的主导因素均是平均风速。塘沽、围场、张家口、承德、遵化、霸州、南宫、石家庄站的ET<sub>0</sub>有所增加，但是增加的原因各不相同，张北ET<sub>0</sub>上升主要归因于平均气温与风速的增加，霸州ET<sub>0</sub>变化主要归因于日照时数的增加。ET<sub>0</sub>下降的15个站点，其变化则主要是由于相对风速的减少引起的。

1980 s ET<sub>0</sub>相对于1970 s变化：京津冀西部的蔚县ET<sub>0</sub>变化的主导因素是日照时数，南部的石家庄ET<sub>0</sub>变化的主导因素是平均气温，其余的21个站点ET<sub>0</sub>变化的主导因素均是平均风速。张北、蔚县、霸州、石家庄、饶阳站的ET<sub>0</sub>有所增加，但是增加的原因各不相同，张北的ET<sub>0</sub>上升主要归因于风速下降，石家庄ET<sub>0</sub>变化主要归因于平均气温的下降。ET<sub>0</sub>下降的18个站点，其变化则主要是由于相对风速的变化引起的。

1990 s ET<sub>0</sub>相对于1980 s变化：京津冀西北部的丰宁、怀来、延庆、蔚县ET<sub>0</sub>变化的主导因素是平均气温，中

部的霸州ET<sub>0</sub>变化的主导因素是日照时数，其余的18个站点ET<sub>0</sub>变化的主导因素均是平均风速。

2000 s ET<sub>0</sub>相对于1990 s变化：京津冀西北部的丰宁、怀来、延庆、蔚县与南部石家庄ET<sub>0</sub>变化的主导因素是平均气温，西北的张北、中部的霸州、南部的石家庄ET<sub>0</sub>变化的主导因素是日照时数，其余的15个站点ET<sub>0</sub>变化的主导因素均是平均风速。

2011—2013年ET<sub>0</sub>相对于2000s ET<sub>0</sub>变化：南部的石家庄、南宫、黄骅与邢台ET<sub>0</sub>变化的主导因素是平均气温，西北的蔚县与张北ET<sub>0</sub>变化的主导因素是日照时数，其余的17个站点ET<sub>0</sub>变化的主导因素均是平均风速。

2014—2016年ET<sub>0</sub>相对于2011—2013年ET<sub>0</sub>变化：西部的张北、张家口、蔚县与东部的青龙、秦皇岛、乐亭、遵化与南部的石家庄、南宫、保定、饶阳、霸州共12各站点ET<sub>0</sub>变化的主导因素是平均气温，其余的11个站点ET<sub>0</sub>变化的主导因素均是平均风速。

对比各时段ET<sub>0</sub>变化的主导因素，风速为主导因素的站点个数随时间呈下降趋势，平均气温为主导的站点个数随时间呈上升趋势，特别是2014—2016年ET<sub>0</sub>相对于2011—2013年ET<sub>0</sub>变化有12各站点的主导因素为平均气温。日照时数为主导因素的站点个数随时间呈上升趋势，但2014—2016年相对于2011—2013年呈下降趋

势, 主要因为 2014—2016 年相对于 2011—2013 年  $ET_0$  变化的多数站点日照时数虽然较上一时段呈现增多趋

势, 但所有站点的气温仍也呈上升趋势, 而且上升幅度大于日照时数的上升幅度。

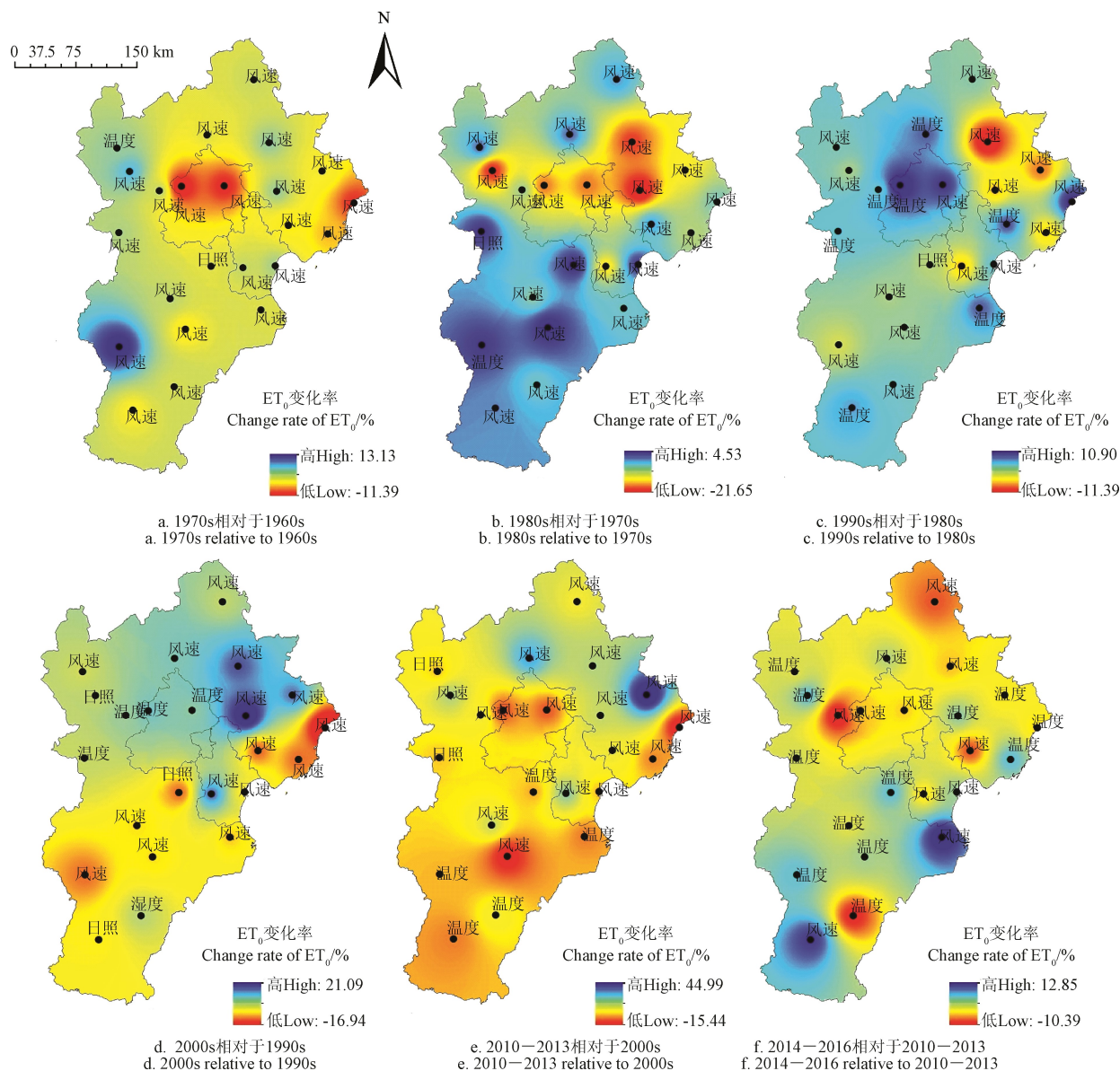


图8 各时段各站点  $ET_0$  变化率及其变化的主导因子

Fig.8  $ET_0$  change rate and its' dominant factor of various station in each period

### 3 讨论

为便于分析近年来京津冀地区雾霾对  $ET_0$  产生的可能影响, 将 1960—2010 年期间每 10 a 作为一个研究时段, 2011—2016 年期间每 3 a 为一个研究时段。京津冀地区近年来工农业快速发展、人口剧增、城市扩张, 雾霾问题日益频繁出现, 根据国家气象局的观测记录显示: 1999 年, 京津冀地区被检测到含有  $PM_{2.5}$  颗粒的天数达到了 30 d, 而到 2013 年激增至 64 d。1999—2013 年京津冀  $PM_{2.5}$  雾霾天数都处于逐渐增长的趋势<sup>[40]</sup>。2014 年年底, 中国“十大空气质量最差城市”榜单中邢台、石家庄、邯郸、唐山、衡水、保定以及廊坊处于前 10 位。2013 年起, 国家开始重点治理京津冀地区空气污染, 京津冀产业结构调整力度加大, 能源消费总量呈下降趋势, 2014 年起京

津冀地区  $PM_{2.5}$  平均浓度有所下降。基于表 2 数据计算得到 2013—2016 年冬季  $PM_{2.5}$  浓度与  $ET_0$  的相关系数为 -0.37 (见表 2), 可见雾霾对  $ET_0$  的影响。

本文认为对全区  $ET_0$  变化贡献最大气象要素为风速, 但风速为主导因素的气象站点个数随时间呈下降趋势, 平均气温与日照时数为主导的气象站点个数随时间呈上升趋势, 特别是 2000 以后, 京津冀地区气温逐年上升, 尤其是冬季气温上升更为明显 (表 2)。2013—2016 年全年、冬季气温与  $PM_{2.5}$  浓度的相关系数分别为 -0.39、-0.44, 全年雾霾浓度与气温呈中度相关。2000 以后, 京津冀地区日照时数呈逐年减少趋势, 尤其是冬季日照时数减少明显 (表 2), 较 1960 s 下降了 30% 左右。2013—2016 年全年、冬季日照时数与  $PM_{2.5}$  浓度的相关系数分别为 -0.42、-0.53, 冬季雾霾浓度与日照时数呈中度相关。

京津冀地区 2013—2016 年全年冬季风速与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的相关系数分别为-0.18、-0.35，相关系数低于日照时数与气温。冬季日照时数、气温与风速与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度系数明显高于全年平均水平，反应了雾霾对日照时数、气温与风速的影响。京津冀地区保定、石家庄、邯郸、邢台、衡水 5 个城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度明显远高于全国平均水平，只有秦

皇岛、张家口、承德低于全国水平<sup>[41]</sup>。以保定为例，近年来冬季日照时数明显低于西北部的张家口，日照时数减少明显，冬季日照时数较 1960 s 减少了接近 40%。由此也可以窥见雾霾对日照时数的影响。1960—2016 年 57 年间京津城市群与西北山区温差为 1.0~1.3℃，且温差整体呈逐年升高趋势，也可以窥见雾霾对气温的影响。

表 2 2010—2016 年京津冀地区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度、各类气象要素与  $\text{ET}_0$  值  
Table 2  $\text{PM}_{2.5}$ , meteorological elements and  $\text{ET}_0$  in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2010 to 2016

年份 Year	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度 Concentration of $\text{PM}_{2.5}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$		日照时数 Sunshine hours/h		平均气温 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$		相对湿度 Relative humidity/%		风速 Wind speed/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )		$\text{ET}_0/\text{mm}$	
	全年 Year	冬季 Winter	全年 Year	冬季 Winter	全年 Year	冬季 Winter	全年 Year	冬季 Winter	全年 Year	冬季 Winter	全年 Year	冬季 Winter
	Year	Winter	Year	Winter	Year	Winter	Year	Winter	Year	Winter	Year	Winter
2010	-	-	2026	490	8.4	-5.6	0.49	0.53	1.94	2.28	1005	116
2011	-	-	2094	559	8.7	-5	0.47	0.45	1.87	2.45	993	124
2012	-	-	2092	624	8.2	-5	0.48	0.63	1.92	2.16	981	122
2013	61	229	2016	469	8.7	-4.4	0.51	0.62	1.9	2.07	1017	125
2014	56	198	1999	489	9.6	-3.9	0.47	0.56	1.61	2.1	981	127
2015	47	210	2022	525	9.2	-3.4	0.49	0.44	1.89	2.01	1013	133
2016	53	204	2024	512	9.1	-4.2	0.5	0.54	1.95	2.3	1019	129
与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关系数 Correlation coefficient with the concentration of $\text{PM}_{2.5}$			-0.42	-0.53	-0.39	-0.44	0.29	0.42	-0.18	-0.35	-0.12	-0.37

注： $\text{PM}_{2.5}$  浓度数据来源文献[42]  
Note: The concentration of  $\text{PM}_{2.5}$  are from[42].

4 结 论

基于以上分析，本文得到主要研究结论如下：  
1) 近 57 a 来，京津冀地区  $\text{ET}_0$  在 1960—1990 整体呈下降趋势，1991 年以后呈上升趋势。 $\text{ET}_0$  空间分布特征整体呈南向北递减趋势（除中部地区的塘沽站、黄骅站与保定站点  $\text{ET}_0$  较高外）。全年  $\text{ET}_0$  的 MK 变化趋势空间分布呈从西北部向东南部递减趋势。 $\text{ET}_0$  春季减幅最明显，其次为秋季、夏季、冬季。5 月份为  $\text{ET}_0$  峰值月份，但随时间右移。  
2) 京津冀地区  $\text{ET}_0$  对相对湿度变化最敏感（敏感系数为-0.44），其次是风速（敏感系数为 0.31）和日照时数（敏感系数为 0.28）、平均气温（敏感系数为 0.26）。 $\text{ET}_0$  对平均气温的正敏感性逐渐增强，而对风度与日照时数的正敏感性整体呈下降趋势，对相对湿度的负敏感性也有所减弱。京津冀地区  $\text{ET}_0$  对各气象要素的敏感性系数存在明显的地域性。从西北到东南，风速与平均气温敏感性系数逐渐递增，而日照时数与相对湿度敏感性系数逐渐递减。即气温高敏感的站点属于相对湿度的低敏感区，日照时数高敏感性的站点属于平均风速低敏感区。  
3) 全区来说， $\text{ET}_0$  虽然对相对湿度变化最为敏感，但相对湿度变化率很小，故全区  $\text{ET}_0$  变化贡献最大的是风速。风速为主导因素的站点个数随时间呈下降趋势，平均气温为主导的站点个数随时间呈上升趋势，说明近年来平均气温与日照时数对潜在蒸散量变化的影响愈加明显。2013—2016 年京津冀地区冬季平均气温、日照时数、相对湿度、风度、 $\text{ET}_0$  与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的相关系数分别为-0.44、-0.53、0.42、-0.35 与-0.37，可见京津冀地区雾霾尤其是冬季雾霾对气象要素均产生一定影响，从而影响  $\text{ET}_0$ 。

【参 考 文 献】

[1] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378—387.  
Gao Ge, Chen Deliang, Ren Guoyu, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000[J]. Geographical Research, 2006, 25(3): 378—387. (in Chinese with English abstract)  
[2] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 1—4.  
Ni Guangheng, Li Xinhong, Cong Zhentao, et al. Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(5): 1—4. (in Chinese with English abstract)  
[3] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377: 687—688.  
[4] Liu Changming, Zeng Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years in the Yellow River Basin[J]. Water International, 2004, 29(4): 510—516.  
[5] Houg J Tuton, Jenkins G J, Ephraums J, et al. Climate Change: The IPCC scientific assessment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.  
[6] Gong Lebing, Xu Chongyu, Chen Deliang, 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(3): 620—629.  
[7] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579—588.  
Liu Changming, Zhang Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China[J]. Acta



- Geographica Sinica, 2011, 66(5): 579—588. (in Chinese with English abstract)
- [8] Stanhill G, Möller M. Evaporative climate change in the British Isles[J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(9): 1127—1137.
- [9] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298(5597): 1410—1411.
- [10] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964—1998[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2002, 111(2): 83—91.
- [11] 谢贤群, 王菱. 中国北方近 50 年潜在蒸散量的变化[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 683—691.  
Xie Xianqun, Wang Ling. Changes of Potential Evaporation in Northern China over the Past 50 Years[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 683—691. (in Chinese with English abstract)
- [12] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agri & Forest Meteorol, 1997, 87(1): 55—73.
- [13] 梁丽乔, 李丽娟, 张丽, 等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 1—5.  
Liang Liqiao, Li Lijuan, Zhang Li, et al. Sensitivity of the reference crop evapotranspiration in growing season in the West Songnen Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘小莽, 郑红星, 刘昌明, 等. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1470—1476.  
Liu Xiaomang, Zheng Hongxing, Liu Changming, et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe river[J]. Basin Resources Science, 2009, 31(9): 1470—1476. (in Chinese with English abstract)
- [15] 佟玲, 康绍忠, 栗晓玲. 石羊河流域气候变化对参考作物蒸发蒸腾量的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 15—18.  
Tong Ling, Kang Shaozhong, Li Xiaoling. Impacts of climate change on reference crop evapotranspiration in Shiyang River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(2): 15—18. (in Chinese with English abstract)
- [16] Burn D H, Hesch N M. Trends in evaporation for the Canadian Prairies[J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(1): 61—73.
- [17] 段春锋, 缪启龙, 曹雯. 西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 77—83.  
Duan Chunfeng, Miao Qilong, Cao Wen. Changing characteristics of reference crop evapotranspiration and main causes in the Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(8): 77—83. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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.  
Wang Xiaodong, Ma Xiaoqun, Xu Ying, et al. Variation of reference crop evapotranspiration and contribution of main factors in the Huaihe Basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(6): 661—667. (in Chinese with English abstract)
- [19] 贾文雄, 何元庆, 王旭峰, 等. 祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 159—167.  
Jia Wenxiong, He Yuanqing, Wang Xufeng, et al. Temporal and spatial change of the potential evaporation over Qilian mountains and Hexi corridor from 1960 to 2006[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 159—167. (in Chinese with English abstract)
- [20] 曹红霞, 栗晓玲, 康绍忠, 等. 陕西关中地区参考作物蒸发蒸腾量变化及原因[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 8—16.  
Cao Hongxia, Su Xiaoling, Kang Shaozhong, et al. Changes of reference crop evapotranspiration and causes in Guanzhong Region of Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 8—16. (in Chinese with English abstract)
- [21] 赵璐, 梁川, 崔宁博, 等. 川中丘陵区参考作物蒸发蒸腾量近 60 年变化成因研究[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 183—190.  
Zhao Lu, Liang Chuan, Cui Ningbo, et al. Attribution analyses of ET<sub>0</sub> change in hilly area of central Sichuan in recent 60 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 183—190. (in Chinese with English abstract)
- [22] 冯禹, 崔宁博, 魏新平, 等. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 78—86.  
Feng Yu, Cui Ningbo, Wei Xinping. Temporal-spatial distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 78—86. (in Chinese with English abstract)
- [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.  
Yin Yunhe, Wu Shaohong, Dai Erfu. Attribution of the space-time evolution of latent evapotranspiration in China from 1971 to 2008[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(22): 2226—2234. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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.  
Zeng Lihong, Song Kaishan, Zhang Bai. Sensitive analysis on reference evapotranspiration to key meteorological factors in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(1): 11—18. (in Chinese with English abstract)
- [25] 赵彩霞, 梅旭荣, 居辉, 等. 黄淮海平原各农业亚区潜在蒸散量变化及其对气候要素的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(5): 570—577.

- Zhao Caixia, Mei Xurong, Ju Hui, et al. Variation in potential evapotranspiration and its sensitivity coefficients to climatic factors in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology[J]. 2015, 36(5): 570—577. (in Chinese with English abstract)
- [26] 吴文玉, 孔芹芹, 王晓东, 等. 安徽省近40年参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. 生态环境学报, 2013(7): 1160—1166.
- Wu Wenyu, Kong Qinqin, Wang Xiaodong, et al. Sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration in Anhui province in the recent 40 years[J]. Ecology and Environment Sciences, 2013(7): 1160—1166. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘艳, 刘帆, 刘新生, 等. 咸阳地区参考蒸散量变化特征及敏感性分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(2): 125—131.
- Liu Yan, Liu Fan, Liu Xinsheng, et al. Reference evapotranspiration: Variation Characteristics and Sensitivity in Xianyang Chinese[J]. Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(2): 125—131. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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.
- Yang Linshan, Li Changbin, Wang Shuaibing, et al. Sensitive analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in Taohe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 102—109. (in Chinese with English abstract)
- [29] 涂安国, 李英, 聂小飞, 等. 鄱阳湖流域参考作物蒸散量变化特征及其归因分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 211—218.
- Tu Anguo, Li Ying, Nie Xiaofei, et al. Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in Poyang Lake watershed[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(2): 211—218. (in Chinese with English abstract)
- [30] Han J, Wang J, Zhao Y, et al. Spatio-temporal variation of potential evapotranspiration and climatic drivers in the Jing-Jin-Ji region, North China[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2018(256/257): 75—83.
- [31] 于占江, 杨鹏. 近40年京津冀蒸发皿蒸发量变化特征及影响因子[J]. 气象科技, 2018, 46(6): 118—125.
- Yu Zhanjiang, Yang Peng. Variation characteristics of pan evaporation capacity and influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region in Recent 40 Years[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(6): 118—125. (in Chinese with English abstract)
- [32] 曹涛, 王赛鸽, 陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 788—799.
- Cao Tao, Wang Saige, Chen Bin. Virtual water analysis for the Jing-Jin-Ji region based on multiregional input-output model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 788—799. (in Chinese with English abstract)
- [33] Hashmi M A, Carcia L A. Spatial and temporal errors in estimating regional evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainages, 1998, 124(2): 108—114.
- [34] 龚元石. Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17 Penman 修正式计算参考作物蒸散量的比较[J]. 北京农业大学学报, 1995, 21(1): 68—75.
- Gong Yuanshi. Comparison of the reference evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith and FAO-PPP-17 Penman methods[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1995, 21(1): 68—75. (in Chinese with English abstract)
- [35] 周平, 陈刚, 刘智勇, 等. 东江流域降水与径流演变趋势及周期特征分析[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 44—51.
- Zhou Ping, Chen Gang, Liu Zhiyong, et al. Variation trend and periodicity analysis of precipitation and runoff in Dongjiang[J]. Watershed Ecological Science, 2016, 35(2): 44—51. (in Chinese with English abstract)
- [36] McCuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation[J]. Water Resource Bulletin 1974, 10(3): 486—498.
- [37] 张调风, 张勃, 梁芸, 等. 黄土高原地区生长季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, 2013, 34(2): 162—169.
- Zhang Tiaofeng, Zhang Bo, Liang Yun, et al. Sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration to key meteorological factors during growing season in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(2): 162—169. (in Chinese with English abstract)
- [38] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 等. 华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5589—5599.
- Wang Pengtao, Yan Janping, Jiang Chong, et al. Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5589—5599. (in Chinese with English abstract)
- [39] Liu Xiaomang, Luo Yuzhou, Zhang Dan, et al. Recent changes in pan-evaporation dynamics in China[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(13): L13404
- [40] 李晓燕. 京津冀地区雾霾影响因素实证分析[J]. 生态经济, 2016, 32(3): 144—150.
- Li Xiaoyan. Empirical analysis of the smog factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Ecological Economy, 2016, 32(3): 144—150. (in Chinese with English abstract)
- [41] 杨兴川, 赵文吉, 熊秋林, 等. 2016年京津冀地区PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及其与气象因素的关系[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1747—1754.
- Yang Xingchuan, Zhao Wenji, Xiong Qiulin, et al. Spatio-temporal distribution of PM<sub>2.5</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) area in 2016 and Its relationship with meteorological factors[J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, 26(10): 1747—1754. (in Chinese with English abstract)
- [42] 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 等. 京津冀秋冬季PM<sub>2.5</sub>污染概况和预报结果评估[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5191—5201.
- Zhu Yuanyuan, Gao Yuxiao, Liu Bing, et al. Concentration characteristics and assessment of model-predicted results of PM<sub>2.5</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5191—5201. (in Chinese with English abstract)

## Spatial-temporal variation characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in Beijing-Tianjin-Hebei region

Bi Yanjie<sup>1,2</sup>, Zhao Jing<sup>1,2</sup>, Zhao Yong<sup>2\*</sup>, Xiao Weihua<sup>2</sup>, Meng Fanjin<sup>1</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, College of Water Resources, Zhengzhou 450046, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** This paper aims to investigate the spatial and temporal variation characteristics of the potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) and its response to climate change using the collected data from the daily weather observation of 23 meteorological stations in the Beijing-Tianjin-Hebei region for 57 years from 1960-2016. The specific parameters of dataset included the daily average air temperature, the maximum and minimum air temperature, relative humidity, wind speed and sunshine hours. We chose the Penman-Monteith formula to calculate the daily  $ET_0$  at each site, and then analyzed the spatial and temporal variation characteristics of the calculated  $ET_0$ . A sensitivity coefficient was used to quantitatively study the sensitivity of  $ET_0$  to various meteorological elements and its spatial and temporal distribution. The contribution rate was set to evaluate the influence of meteorological elements changes on the variation of  $ET_0$  during the calculation. The results show that: 1) The spatial distribution of  $ET_0$  shows a decreasing trend from south to north across the Beijing-Tianjin-Hebei region, except a high  $ET_0$  in the central region, such as Tanggu, Huangye and Baoding stations. There was a linear decline rate of  $-0.92\text{mm/a}$  in the whole distribution of  $ET_0$ . The spatial distribution of  $ET_0$  MK (Penman-Monteith) decreased from the northwest to southeast. In temporal characteristics, spring has the most obvious decrease, followed by autumn, summer, and winter. 2) The sensitivity coefficient of  $ET_0$  to the average air temperature, sunshine hours, relative humidity and wind speed are 0.26, 0.28, 0.31 and -0.44, respectively, indicating the most sensitive to the changes of relative humidity in the Beijing-Tianjin-Hebei region, followed by the wind speed and sunshine hours. The sensitivity coefficient of  $ET_0$  to meteorological elements presents in a fluctuating trend from 1960-2016, the sensitivity coefficient of  $ET_0$  to the wind speed and relative humidity in a downward trend, while the sensitivity coefficient of  $ET_0$  to average temperature and sunshine hours in an upward trend. The spatial distribution of the sensitivity coefficient from northwest to southeast: the wind speed and average temperature gradually increased, while the sunshine hours and relative humidity gradually decreased. The spatial distribution characteristics of the sensitivity coefficient of  $ET_0$  to relative humidity and average temperature were the opposite situation, where the high sensitivity zone of average temperature belongs to the low sensitive zone of relative humidity. The opposite phenomenon also occurred in the spatial distribution characteristics of the sensitivity coefficient of  $ET_0$  to sunshine hours and wind speed sensitivity, i.e., the high sensitivity zone of sunshine hours belongs to the low sensitive zone of wind speed. 3) The contribution rate of meteorological elements to  $ET_0$  depends on the sensitivity coefficient and the relative change of meteorological elements.  $ET_0$  has the most sensitivity to the changes of relative humidity, but the change rate of the relative humidity was small.  $ET_0$  has the lower sensitive to the changes of wind speed, but the change rate of the wind speed was large, resulting the most contribution to  $ET_0$  in the whole region was the wind speed. However, the stations number of the wind speed as the dominant factor decreased with the measure time, whereas the stations number of the average temperature as the dominant factor increased with the measure time, especially in the period of 2010—2014 to 2010s, 12 stations with the average temperature as the dominant factor. The stations number of the sunshine hours as the dominant factor also increased with the measured time. It infers that the average temperature and sunshine hours have much significant influences on  $ET_0$  in recent years. From 2013 to 2016, the correlation coefficients of the winter average air temperature, sunshine hours, relative humidity, wind speed and  $PM_{2.5}$  concentration were -0.44, -0.53, 0.42 and -0.35, respectively, while the correlation coefficients of  $ET_0$  and  $PM_{2.5}$  concentration were -0.37. Therefore, it is possible that the haze, especially winter haze, has a certain impact on meteorological elements, and thereby on  $ET_0$  in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

**Keywords:** transpiration; evaporation; potential evapotranspiration; spatial and temporal variation; sensitivity analysis; contribution rate; climate change; Beijing-Tianjin-Hebei