

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2019.0061

李元菲,张兰霞,曹永强,等. 河北省潜在蒸散量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 67-78. LI Y F, ZHANG L X, CAO Y Q, et al. Spatiotemporal variations of potential evapotranspiration and its climate influencing factors in Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 67-78. (in Chinese)

# 河北省潜在蒸散量时空变化特征及气候影响因素分析

李元菲<sup>1</sup>, 张兰霞<sup>2</sup>, 曹永强<sup>1</sup>, 肖春柳<sup>1</sup>, 刘明阳<sup>1</sup>

(1. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 大连 116029; 2. 北京清流技术股份有限公司, 北京 100073)

**摘要:**潜在蒸散量是确定作物需水量的重要依据和基础,准确估算和科学分析其气象影响因素,对于优化调整农业种植结构及合理配置水土资源具有重要意义。根据河北省及相邻行政区内24个气象站点1960—2016年的逐日气象数据,采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式计算潜在蒸散量( $ET_0$ ),利用敏感系数和贡献率对 $ET_0$ 变化的气候影响因素进行分析,结果表明:近57年来河北省 $ET_0$ 多年平均值为1 095.70 mm,整体呈显著下降趋势,平均下降幅度为-8.91 mm/(10a); $ET_0$ 年内变化率夏季最高,冬季最低; $ET_0$ 空间分布大致自西向东呈半环状递减趋势,四季与年尺度格局基本一致。河北省年平均 $ET_0$ 对相对湿度表现为负敏感,对其他气象因子表现为正敏感。 $ET_0$ 年变化对各气象因子的敏感程度依次为相对湿度>最高气温>平均风速>日照时数>平均气温>最低气温,其变化对气象因子的敏感性存在空间差异。平均风速是河北省 $ET_0$ 全年及春、秋、冬三季变化的主导因子,日照时数为夏季 $ET_0$ 变化的主导因子。空间分布上,西北部地区 $ET_0$ 变化的主导因子为平均气温,东北部地区为日照时数,中南部及沿海地区 $ET_0$ 变化的主导因子为平均风速。该研究成果可为水资源的优化配置及区域干旱评价提供一定的理论支撑。

**关键词:**潜在蒸散量;Penman-Monteith;敏感分析;贡献分析;河北省

中图分类号:P468

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Spatiotemporal variations of potential evapotranspiration and its climate influencing factors in Hebei Province

LI Yuanfei<sup>1</sup>, ZHANG Lanxia<sup>2</sup>, CAO Yongqiang<sup>1</sup>, XIAO Chunliu<sup>1</sup>, LIU Mingyang<sup>1</sup>

(1. School of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2. Beijing Qingliu Technology Co., Ltd., Beijing 100073, China)

**Abstract:** The potential evapotranspiration is an important basis for determining the crop water demand. Accurate estimation and attribution its meteorological influencing factors are of great significances for optimizing the adjustment of agricultural planting structure and rational allocation of water and soil resources. The spatiotemporal variations of potential evapotranspiration and its climate influencing factors in Hebei Province were investigated based on daily weather data from 1960-2016 at 24 meteorological stations in Hebei Province and adjacent administrative regions, Penman-Monteith formula sensitivity coefficient, and contribution rate. Results showed that the average  $ET_0$  in Hebei Province was 1095.70 mm in the past 57 years. It showed an overall downward trend with an average magnitude of -8.905 mm/(10a). The  $ET_0$  change rate of was the highest in summer season

收稿日期:2018-11-26 修回日期:2018-12-26 网络出版时间:2019-01-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190118.2139.010.html>

基金项目:国家自然科学基金(51579126;51779114);辽宁省“百千万人才工程”资助基金;大连市科技创新基金(2018J13SN116)

作者简介:李元菲(1995—),女,河北邯郸人,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zhaojiao13@163.com

通信作者:曹永强(1972—),男,内蒙古乌盟丰镇人,教授,博士生导师,从事水文水资源方面研究。E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

and the lowest in winter season. The spatial distribution showed a general semi-circular decreasing trend from west to east, and its seasonal variations were basically consistent with that of annual scale. The annual average  $ET_0$  was negatively sensitive to relative humidity and positively to other meteorological factors. The sensitivity of each meteorological factor was: relative humidity > maximum temperature > average wind speed > sunshine hours > average temperature > minimum temperature. The average wind speed was the dominant factor for the change of  $ET_0$  in the whole year and in spring, autumn and winter seasons. Sunshine hours were the dominant factor for the change of summer  $ET_0$ . In terms of spatial distribution, the dominant factor of  $ET_0$  variation in the northwestern region was the average temperature, the northeastern region the sunshine hours, and the central and southern regions the average wind speed. The results can provide theoretical supports for the optimal allocation of water resources and regional drought assessment.

**Key words:** potential evapotranspiration; Penman-Monteith; sensitivity analysis; contribution analysis; Hebei Province

蒸散发是土壤—植被—大气系统中能量传递和水分转化的主要途径<sup>[1]</sup>,潜在蒸散量是指在水分供应不受限制时,某一下垫面能够达到的最大蒸散量<sup>[2]</sup>,其作为热量平衡和水分平衡的重要组分,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>[3-5]</sup>,在全球变暖的背景下已成为多个研究领域的热点问题<sup>[6]</sup>。

一般认为温度升高将使地球表面的空气变干,从而增加潜在蒸散量,然而诸多学者研究成果表明,在全球变暖背景下,世界多地出现了预测值与观测值相悖的“蒸发悖论”<sup>[7-12]</sup>,引起学界对其成因机制展开广泛探讨。早期学者<sup>[13-15]</sup>多通过相关性分析研究潜在蒸散量与气象因子之间的定性关系。基于定量分析的需求,国外学者 McCuen<sup>[16]</sup>在 1974 年首次尝试将敏感性分析方法引入潜在蒸散量的研究。近年来,国内学者也多利用敏感性分析方法来研究  $ET_0$  变化成因,并取得了一定成果。曾丽红等<sup>[17]</sup>采用响应曲线、敏感矩阵、敏感系数等方法分析了 1961—2008 年东北地区生长季  $ET_0$  的变化成因,得出气温变化对  $ET_0$  的影响最为明显。曹雯等<sup>[18]</sup>基于彭曼公式计算了西北地区 1961—2009 年的生长季  $ET_0$  对气温、风速、相对湿度和太阳总辐射的敏感系数,结果表明西北地区生长季  $ET_0$  对太阳总辐射最敏感。刘勤<sup>[19]</sup>和王晓东<sup>[20]</sup>等人分别得出黄河流域和淮河流域  $ET_0$  对相对湿度最敏感。

近年来,河北省干旱化趋势愈加明显,水资源严重匮乏。自 20 世纪 80 年代以来,受自然降水减少、地表水资源严重不足和用水量明显增加的共同影响,地下水长期过量开采,出现了总面积超过

4 万  $km^2$  的地下水漏斗区<sup>[21]</sup>。河北省作为我国重要的粮食主产区之一,用水结构中的农业用水占比大,作为农业生产的命脉,水资源能否得到科学配置和合理利用将直接影响农业的可持续发展<sup>[22]</sup>。同时,潜在蒸散量异常变化会影响地区的水热平衡和气候的干湿状况,从而诱发洪涝或干旱等气象灾害,加重对水资源的扰动,对生态环境造成不利影响。鉴于此,水资源供需状况及变化特征备受关注。李春强等<sup>[23]</sup>采用相关系数分析了河北省 1965—1999 年  $ET_0$  与气候变化的关系;张可慧等<sup>[9]</sup>选取积温法、蒸发皿蒸散发量估算法及彭曼公式法对河北省 1956—2007 年  $ET_0$  进行估算,采用逐步回归方法分析蒸发皿蒸散发量与各气候因子之间的相关系数;鉴于河北省潜在蒸散量相关研究时段较老,且分析方法除相关分析外,采用敏感系数的缺陷在于各气象要素的变化不同步,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,本文尝试将潜在蒸散量的敏感性分析和贡献率相结合的方法,试探求 1960—2016 年潜在蒸散量变化的主要气候影响因子,旨在为变化环境下高效利用与管理河北省农业用水提供理论基础与科学指导。

## 1 区域概况与资料方法

### 1.1 研究区概况

河北省东临渤海、西依太行山、内环京津 ( $36^{\circ}05' \sim 42^{\circ}40'N, 113^{\circ}27' \sim 119^{\circ}50'E$ ),下辖 11 个地级市,省会为石家庄,地势西北高、东南低,自西北向东南倾斜(图 1)。气候类型为暖温带大陆性季风气候,冬季干寒少雪,夏季炎热多雨,多年平均气温介于  $-1.5 \sim 15.2^{\circ}C$ ,年无霜期 81~204 d,年均降水量 484.5 mm,具有空间分布不均且年际变化较大的特点。年日照时数为 2 303.1 h,空间分布上自西北向东南递减。



图1 研究区及站点分布

Fig. 1 Study area and locations of weather stations

## 1.2 数据来源及处理

气象数据均来源于中国气象数据网,包括逐日气温、日照时数、平均风速、相对湿度及平均水汽压等气象资料。为保证空间插值精度,选取18个省内站点的同时,增加了大同、灵丘、五台山、安阳、北京和天津6个省外站点。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 潜在蒸散量( $ET_0$ )计算公式

本文采用FAO-56推荐的Penman-Monteith模型计算 $ET_0$ 。该公式综合反映了蒸发必须具备的条件,综合了空气动力学和太阳辐射等关键因素的影响,具有坚实理论基础,物理意义明确,仅受气象要素影响,与下垫面、土壤类型无关,且计算结果精准适用于不同气候类型地区潜在蒸散量的计算,因而在全球范围内得到广泛应用。具体计算方法为

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

式中: $ET_0$ 为潜在蒸散量(mm); $\Delta$ 为饱和水汽压与空气温度关系曲线的斜率(kPa/°C); $R_n$ 为到达地面的净辐射量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; $G$ 为土壤热通量密度[MJ/(m<sup>2</sup>·d)]; $\gamma$ 为湿度计常数(kPa/°C); $U_2$ 为地面上2 m高处风速(m/s); $e_s$ 为空气饱和水汽压(kPa); $e_a$ 为空气实际水汽压(kPa)。

### 1.3.2 气象因子的敏感系数和贡献率

敏感系数定义为 $ET_0$ 变化率与气象因子变化率的比值<sup>[16]</sup>。具体计算方法为

$$S_{v_i} = \lim_{\Delta v_i \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta v_i / v_i} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial v_i} \cdot \frac{v_i}{ET_0} \quad (3)$$

式中: $S_{v_i}$ 为敏感系数; $ET_0$ 和 $v_i$ 分别为潜在蒸散量及气象因子; $\Delta ET_0$ 和 $\Delta v_i$ 分别为其变化量。敏感系数的正负反映了 $ET_0$ 与气象因子的相关性,敏感系数为正表明气象因子与 $ET_0$ 呈正相关;反之呈负相关。绝对值的大小为气象因子对 $ET_0$ 的影响程度,绝对值越大,气象因子的影响越大<sup>[24-26]</sup>。为研究方便,本文将平均风速、日照时数、相对湿度、最高气温、最低气温和平均气温分别简称为WS、SH、RH、HT、LT、AT,则各气象因子的敏感系数分别表示为 $S_{WS}$ 、 $S_{SH}$ 、 $S_{RH}$ 、 $S_{HT}$ 、 $S_{LT}$ 、 $S_{AT}$ 。

贡献率为 $ET_0$ 对该气象因子的敏感系数与该因子多年相对变化率的乘积<sup>[12]</sup>,即

$$Con_{v_i} = S_{v_i} \cdot RC_{v_i} \quad (4)$$

$$RC_{v_i} = \frac{m \times Trend_{v_i}}{|av_{v_i}|} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $Con_{v_i}$ 是气象因子 $v_i$ 对 $ET_0$ 变化的贡献; $RC_{v_i}$ 是 $v_i$ 的多年相对变化率<sup>[27]</sup>;  $m$ 为总年数; $Trend_{v_i}$ 为 $v_i$ 的年气候倾向率,即一元线性回归方程的斜率; $av_{v_i}$ 为 $v_i$ 的多年平均值。

### 1.3.3 数据分析方法

分别通过线性回归分析及Mann-Kendall趋势检验法<sup>[28]</sup>分析 $ET_0$ 及气象因子的长期变化趋势,并进行显著性检验,应用敏感性量化分析主要气象因子对 $ET_0$ 变化的影响程度及其贡献量;在ArcGIS平台上应用反距离权重插值方法<sup>[29]</sup>对研究区 $ET_0$ 分布及变化进行插值,分析其空间分布特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 潜在蒸散量及气象因子的趋势特征

#### 2.1.1 年际变化趋势

河北省年平均 $ET_0$ 及气象因子的变化趋势见图2。由图可知,近57年来,河北省多年平均 $ET_0$ 为1095.70 mm,总体呈下降趋势,下降幅度为-8.91 mm/(10a)。且由M-K统计曲线可知 $ET_0$ 下降趋势通过了95%的置信度检验,且UF和UB两条曲线在1976年出现突变点,突变前 $ET_0$ 平均下降幅度为-7.80 mm/(10a),突变后平均下降幅度为-3.07 mm/(10a),1976年后 $ET_0$ 下降趋势变缓。

各气象因子中平均风速、日照时数和相对湿度随时间呈下降趋势,而最高气温、最低气温和平均气温随时间呈显著上升趋势,且均通过了95%的显著性检验。其中,平均风速多年平均值为2.52 m/s,

下降幅度为  $-1.53(\text{m/s})/(10\text{a})$ ,张素云等<sup>[30]</sup>研究表明河北省风速下降是大尺度环流场的改变、冬季风减弱、副高面积指数上升以及城市化过程综合作用的结果;日照时数多年平均值为 7.15 h,减少幅度为  $-0.23 \text{ h}/(10\text{a})$ ,究其原因,主要与人为排放的气溶胶浓度(特别是硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶)增加有关,此外,过去的 40 至 50 年华北的雾日和低层云量呈增多趋势,因此气溶胶及其伴生的轻雾和低

云影响可能是主导因素<sup>[31]</sup>;相对湿度多年平均值为 59.30%,减少幅度为  $-0.44\%/ (10\text{a})$ ;最高气温、最低气温和平均气温多年平均值分别为  $16.08 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $4.55 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $9.87 \text{ }^\circ\text{C}$ ,上升幅度分别为  $0.25 \text{ }^\circ\text{C}/(10\text{a})$ 、 $0.47 \text{ }^\circ\text{C}/(10\text{a})$  和  $0.34 \text{ }^\circ\text{C}/(10\text{a})$ 。增强的大气温室效应可能是气候变暖的主要原因<sup>[32-33]</sup>,此外,城镇化引起的地面气温上升对区域平均气温增加趋势的贡献非常明显,在华北地区平均达到近 40%<sup>[31]</sup>。

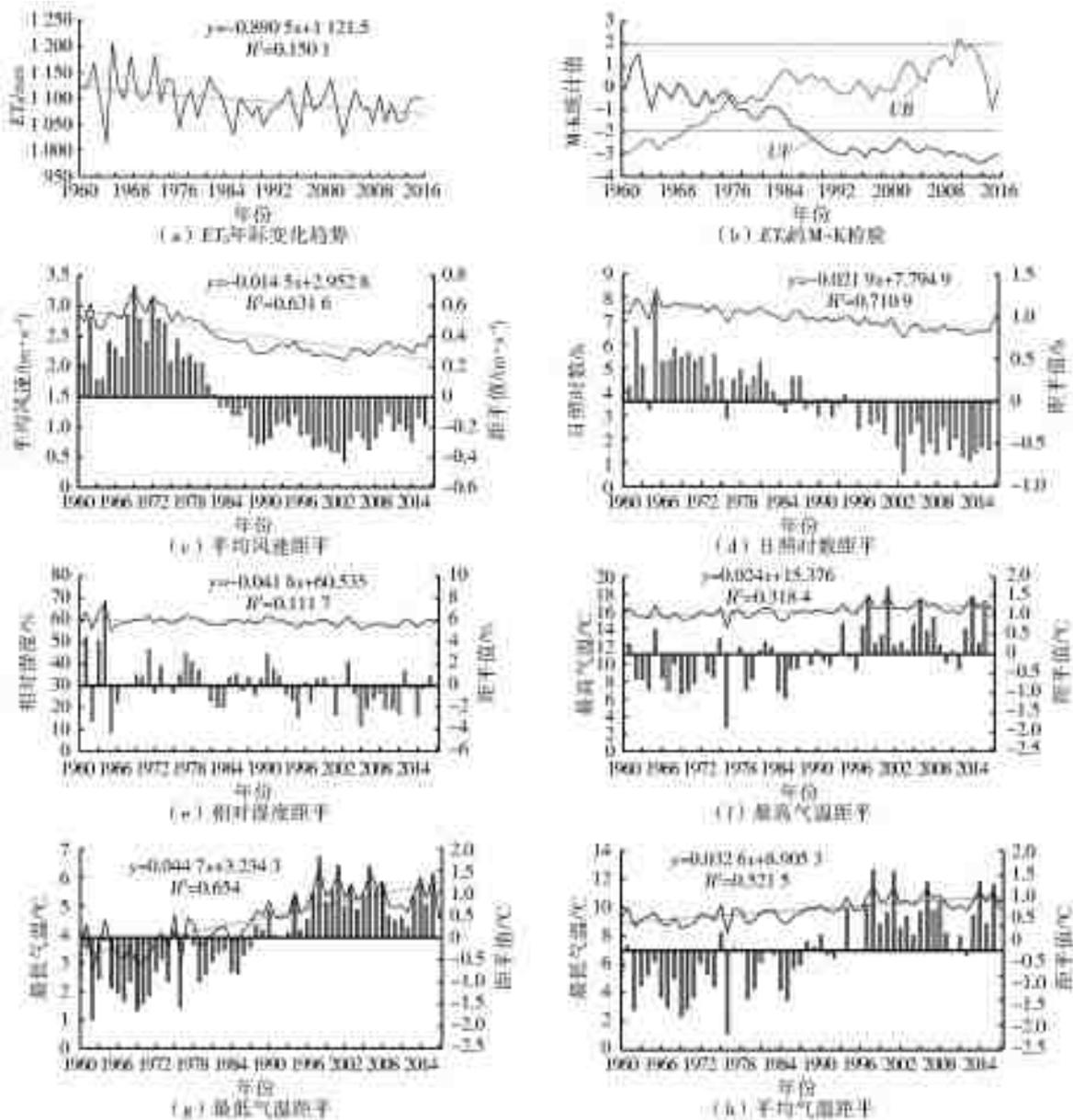


图 2 潜在蒸散量及气象因子年值变化趋势

Fig. 2 Time series of potential evapotranspiration and meteorological factors

### 2.1.2 季节变化趋势

由表 1 可知,河北省  $ET_0$  及主要气象因子季节变化明显。 $ET_0$  夏季最高,多年平均值为 436.82 mm,冬季最低,为 94.94 mm。各季节多年平均  $ET_0$  均呈下降趋势,且 M-K 趋势检验结果表明,除冬季外,下降趋势均通过了显著性检验。夏季变化趋势最为

明显,下降幅度为  $-6.15 \text{ mm}/(10\text{a})$ ,冬季下降幅度最小,为  $-0.03 \text{ mm}/(10\text{a})$ 。平均风速春季最高,为 3.12 m/s,夏季最低,为 2.18 m/s,各季节平均风速变化与年际变化保持一致,均通过了置信度 95% 的显著性检验,呈显著下降趋势;日照时数春季最高,为 8.11 h,冬季最低,为 6.14 h,各季节日照时数同

样与年际变化保持一致,呈显著下降趋势;相对湿度夏季最高,春季最低,下降趋势春季最为明显;各季节

最高气温、最低气温及平均气温变化均通过了置信度95%的显著性检验,呈显著上升趋势。

表 1 河北省潜在蒸散量及气象因子季节变化趋势

Tab. 1 Seasonal trends of potential evapotranspiration and meteorological factors in Hebei Province

气象因子	春季		夏季		秋季		冬季	
	均值	变化率	均值	变化率	均值	变化率	均值	变化率
$ET_0/mm$	356.52	-0.80	436.82	-6.15	207.39	-1.93	94.96	-0.03
平均风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	3.12	-0.19	2.18	-0.08	2.24	-0.13	2.55	-0.21
日照时数/h	8.11	-0.12	7.54	-0.33	6.80	-0.26	6.14	-0.22
相对湿度/%	49.43	-0.79	70.73	-0.61	64.16	-0.36	53.35	-0.02
最高气温/ $^{\circ}C$	17.64	0.32	28.75	0.62	16.68	0.17	1.32	0.32
最低气温/ $^{\circ}C$	4.87	0.5	18.32	0.30	5.08	0.39	-10.00	0.65
平均气温/ $^{\circ}C$	11.03	0.39	23.24	0.20	10.28	0.26	-5.02	0.49

## 2.2 潜在蒸散量空间分布及变化趋势

### 2.2.1 潜在蒸散量的空间分布

1960—2016年河北省年潜在蒸散量在956.98~1313.68 mm,均值为1095.70 mm,大致自西向东

呈半环状递减趋势(图3(a)),年 $ET_0$ 高值分布区在河北省西北部的张北、蔚县及丰宁一带,其原因与地形带来的影响有关,年 $ET_0$ 高值区在地形上分别属于冀北高原区、太行山区及燕山丘陵区,海拔较

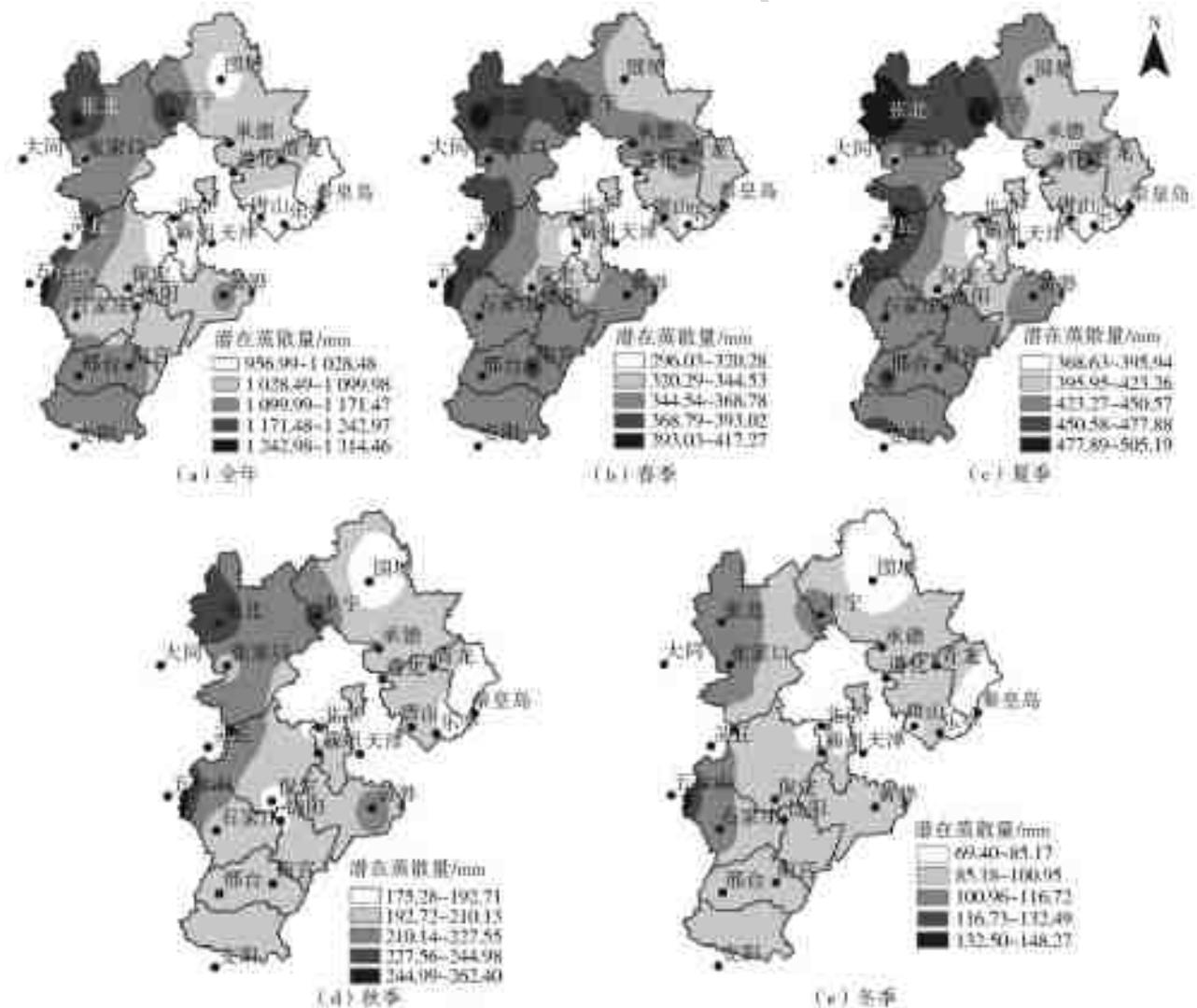


图 3 潜在蒸散量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of potential evapotranspiration

高,风速较大,同时气压较低,空气密度较小,相对湿度较小,因此潜在蒸散量较大,而低值区在海拔较低、距海较近的中东部及东北部地区。春季至冬季(图 3(b)至 3(e)) $ET_0$  分布也总体上呈自西向东的半环状递减趋势。与年  $ET_0$  相比,春季和夏季  $ET_0$  高值区和中值区向东有所扩张,低值区相应的有所收缩。秋季  $ET_0$  空间分布与年  $ET_0$  基本一致。冬季  $ET_0$  整体偏低,高值区向西北方向有所收缩。

### 2.2.2 潜在蒸散量的空间变化趋势

近 57 年河北省各地年平均  $ET_0$  的变化幅度在  $-27.37\sim 4.31$  mm/(10a),均值为  $-10.03$  mm/(10a)。线性变化趋势特点不一,河北省内 18 个站点中有 15 个站点年平均  $ET_0$  呈下降趋势,且经 M-K 检验

结果表明,除唐山外,均通过了 95% 的置信度检验。而蔚县、邢台和张家口年平均  $ET_0$  呈上升趋势,变化幅度分别为 4.44 mm/(10a)、3.43 mm/(10a)和 2.84 mm/(10a),并分别在 1973、2011 和 2002 年通过置信度 95% 的显著性检验。

由图 4 可知,四季变化分布中,夏季  $ET_0$  的变化幅度最大,在  $-13.05\sim 1.86$  mm/(10a),均值为  $-6.36$  mm/(10a),18 个站点中仅张家口  $ET_0$  呈上升趋势,但未通过显著性检验。冬季  $ET_0$  的变化幅度最小,变化幅度在  $-4.14\sim 3.1$  mm/(10a),均值为  $-0.43$  mm/(10a),张北、蔚县、邢台和青龙  $ET_0$  呈显著上升趋势,而遵化、秦皇岛、霸州、乐亭和南宫  $ET_0$  呈显著下降趋势。

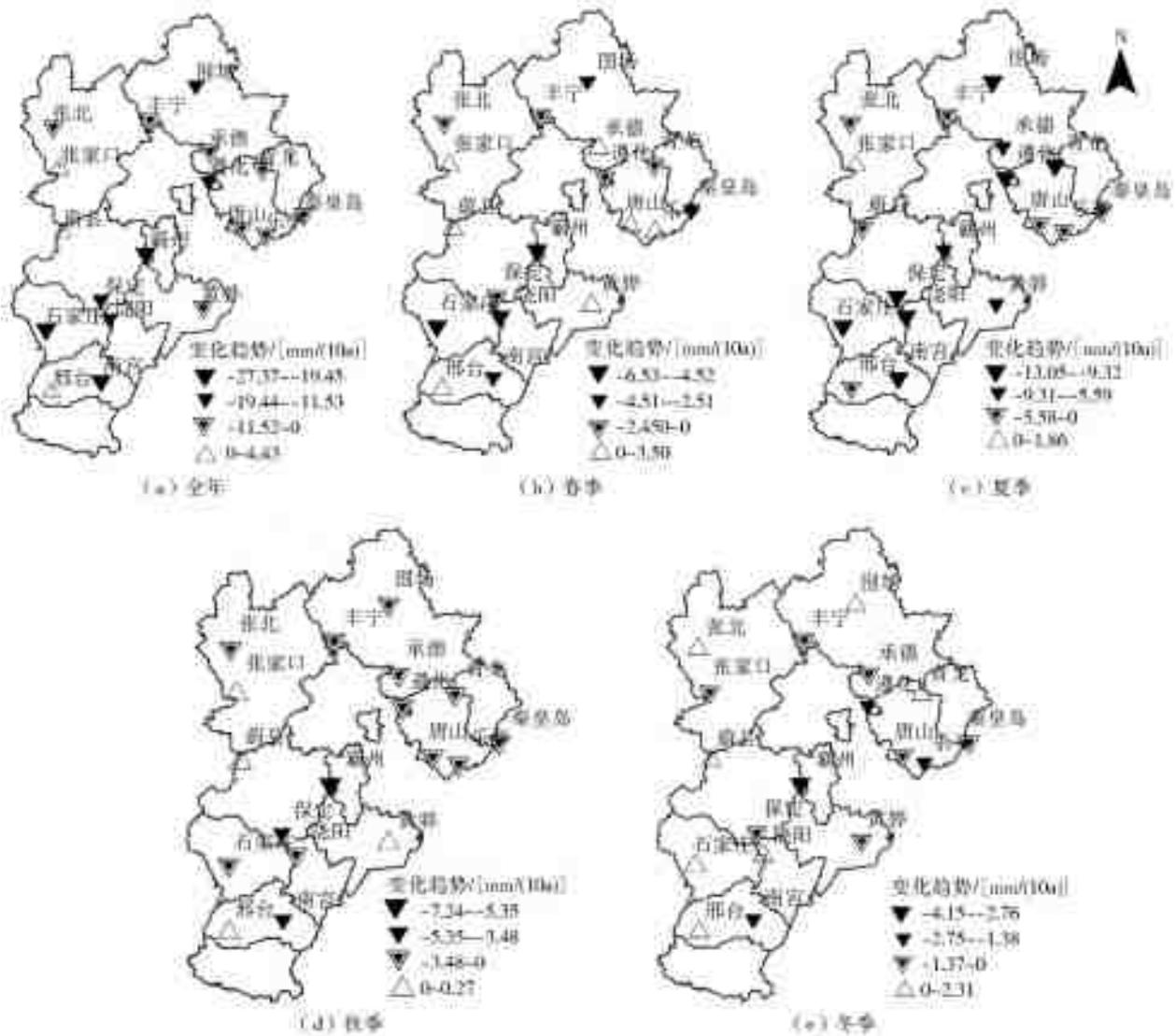


图 4 潜在蒸散量空间变化趋势

Fig. 4 Spatial trend of potential evapotranspiration

## 2.3 潜在蒸散量对气象因子的敏感性

### 2.3.1 $ET_0$ 对气象因子的敏感系数

近 57 来,河北省  $ET_0$  年变化对相对湿度的敏

感系数为负值,表明随着相对湿度的提升  $ET_0$  将会减少。而  $ET_0$  年变化对其他气象因子的敏感系数为正值,表明  $ET_0$  将随着以上气象因子的升高而增

加。通过比较敏感系数的绝对值可知,  $ET_0$  年变化对各气象因子的敏感程度依次为相对湿度 > 最高气

温 > 平均风速 > 日照时数 > 平均气温 > 最低气温 (表 2)。

表 2 河北省不同季节气象因子敏感系数

Tab. 2 Sensitivity factors of meteorological factors in different seasons in Hebei

季节	平均风速	日照时数	相对湿度	最高气温	最低气温	平均气温
春季	0.16	0.14	-0.33	0.26	0.04	0.02
夏季	0.07	0.17	-0.38	0.18	0.07	0.11
秋季	0.17	0.15	-0.52	0.20	0.03	0.05
冬季	0.26	0.11	-0.54	0.05	-0.10	-0.08
全年	0.17	0.14	-0.44	0.18	0.01	0.03

从年际变化来看,各气象因子敏感系数年际变化的方差均较小,表明其离散程度均比较小,年际变化不大。 $S_{SH}$  与  $S_{AT}$  的线性变化趋势分别为  $-4 \times 10^{-3}/(10a)$  和  $-5 \times 10^{-5}/(10a)$ ,表明  $ET_0$  年变化对日照时数及平均气温的正敏感性有所减弱,而  $S_{WS}$ 、 $S_{RH}$ 、 $S_{HT}$ 、 $S_{LT}$  呈现上升趋势,其中  $S_{RH}$  的线性倾向率较大,表明  $ET_0$  年变化对相对湿度的负敏感性显著增强。

四季中春、夏、秋三季  $ET_0$  变化均对平均风速、日照时数、最高气温、最低气温及平均气温呈正敏感,对相对湿度负敏感。而冬季  $ET_0$  变化对相对湿度、最低气温及平均气温均为负敏感。但通过比较敏感系数绝对值可知,四季  $ET_0$  变化对相对湿度最为敏感。从敏感系数的变化趋势来看,夏季与秋季均与年际变化趋势相同, $ET_0$  变化对日照时数及平均气温正敏感减弱,而对其他气象因子的敏感性有所增强;而春季  $S_{SH}$  与  $S_{HT}$  线性变化趋势分别为  $-1 \times 10^{-3}/(10a)$  和  $-2 \times 10^{-3}/(10a)$ ,表明  $ET_0$  变化对日照时数及最高气温的正敏感性有所减弱,而对其他气象因子敏感性增强。冬季除  $S_{SH}$  线性变化趋势为  $-3 \times 10^{-3}/(10a)$  外,气象因子敏感系数线性变化趋势均为正值,表明  $ET_0$  冬季变化仅对日照时数的正敏感性有所减弱。

河北省 18 个站  $S_{WS}$ 、 $S_{SH}$  和  $S_{HT}$  均为正值, $S_{RH}$  均为负值,进一步表明年平均  $ET_0$  对平均风速、日照时数和最高气温为正敏感,对相对湿度为负敏感。张北、蔚县、邢台、丰宁和围场  $ET_0$  对最低气温为负敏感,其余 13 站对最低气温为正敏感。张北、蔚县  $ET_0$  对平均气温为负敏感,其余各市(县)  $ET_0$  对平均气温为正敏感。由图 5 可以看出,空间分布上各地年平均  $ET_0$  变化对平均风速敏感系数除张家口地区外,由西向东递增明显。冀东北、中东部地区及张家口为敏感系数高值区,而张北地区为低值区。绝大多数地区年平均  $ET_0$  对日照时数的敏感系数介于 0.12~0.16,邢台、黄骅敏感系数最小,而西北

部地区的张北、丰宁、围场一带为高值区。最高气温的敏感系数分布特征与平均风速大致相同,但高值分布区有向东收缩趋势。 $ET_0$  变化对相对湿度为负敏感,敏感系数的绝对值大致自西向东呈半环状的递增趋势。最低气温和平均气温敏感系数的负值区分布在河北省西北及西南地区。对比各气象因子敏感系数的空间分布可得, $S_{WS}$ 、 $S_{HT}$  及  $S_{RH}$  (绝对值)高值分布区大致与  $S_{SH}$  的低值分布区相当,说明对日照时数敏感程度低的地区对平均风速、最高气温和相对湿度的更敏感。

### 2.3.2 潜在蒸散量变化的主导因子

$ET_0$  变化的主导因子即贡献量最大的因子<sup>[29]</sup>。由表 3 可知,平均风速对  $ET_0$  年变化的贡献量的绝对值最大,为  $-5.71\%$ ,是河北省  $ET_0$  年变化的主导因子,其次为日照时数( $-2.49\%$ ),而相对湿度、最高气温、最低气温和平均气温的贡献率虽均为正值,但相加之和仍未能抵消平均风速及日照时数对  $ET_0$  影响,因此,河北省年潜在蒸散量呈递减趋势。

由于不同季节的气候特征不同, $ET_0$  变化的主导因子存在季节差异。春、秋、冬三季平均风速对  $ET_0$  变化的贡献量最大,分别为  $-5.49\%$ 、 $-5.87\%$  及  $-12.24\%$ , $ET_0$  减小的主要原因仍为平均风速及日照时数的共同影响。夏季  $ET_0$  变化的主导因子为日照时数,总体上同样呈下降趋势。

表 3 河北省不同季节气象因子对  $ET_0$  变化的贡献率

Tab. 3 Contribution rates of meteorological factors in different seasons to changes in  $ET_0$  in Hebei Province

气象因子	单位: %				
	全年	春季	夏季	秋季	冬季
平均风速	-5.71	-5.49	-1.40	-5.87	-12.24
日照时数	-2.49	-1.25	-4.16	-3.20	-2.13
相对湿度	1.86	2.97	1.84	1.65	0.14
最高气温	1.56	2.70	0.60	1.18	6.86
最低气温	0.50	2.27	0.63	1.19	-3.70
平均气温	0.52	0.43	0.58	0.70	-4.52

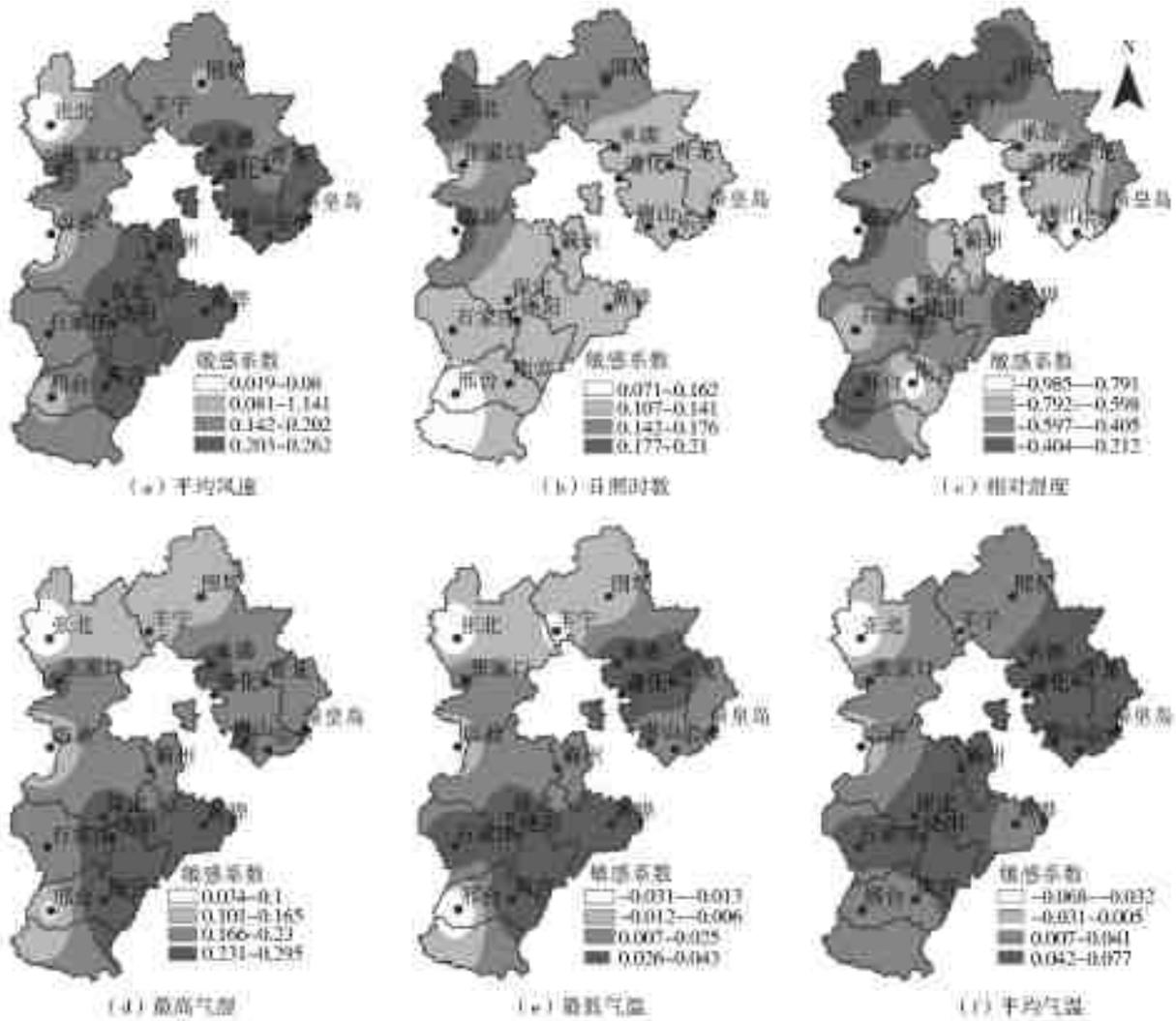


图 5 年均  $ET_0$  对气象因子敏感系数的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of annual average  $ET_0$  sensitivity coefficient to meteorological factors

河北省  $ET_0$  变化的主导因子存在空间差异(图 6)。张家口、蔚县和邢台年平均  $ET_0$  呈上升趋势,其中张家口年平均  $ET_0$  上升的主要原因为相对湿度的下降,而蔚县、邢台主要归因于最低气温的上升,作为  $ET_0$  变化的主导因子,贡献率分别为 6.44% 和 30.22%。其余各站年平均  $ET_0$  均呈下降趋势,其中,平均风速作为主导因子引起  $ET_0$  变化的站点有 11 个,主要分布在河北省中部、北部及冀东沿海地区,在数量上占绝对优势,平均气温的下降和日照时数的减少分别是张北和围场  $ET_0$  下降的主要原因,而遵化和青龙年平均  $ET_0$  下降则主要归因于相对湿度的增加。

春、秋、冬三季,平均风速作为主导因子引起  $ET_0$  变化的站点在数量上占绝对优势,而夏季绝大多数站点  $ET_0$  下降归因于日照时数的减少。

春季,蔚县、张家口、承德地区  $ET_0$  上升的主导因子均为相对湿度的下降,邢台、唐山、乐亭和黄骅  $ET_0$  上升的主导因子均为春季平均风速的增大。其

余 11 个站点  $ET_0$  均呈下降趋势,其中平均风速下降引起  $ET_0$  减少的站点分别为石家庄、饶阳、南宫、丰宁、霸州和秦皇岛。张北、围场地区春季  $ET_0$  减小的主要原因与全年一致,均为日照时数的减少。遵化、青龙和保定  $ET_0$  下降的主导因子均为相对湿度的增加。

夏季,仅张家口地区  $ET_0$  呈上升趋势,主要原因为相对湿度的减少,贡献率为 8.94%。而  $ET_0$  下降的站点中,有 11 个站点主要原因为日照时数的减少,分布在河北省中部和北部地区。河北省南部的邢台和南宫  $ET_0$  下降主要归因于平均风速的减小。霸州及冀东沿海地区主要归因于相对湿度的增加。

秋季,蔚县、邢台和黄骅  $ET_0$  上升主要原因分别为日照时数、最低气温和平均风速的增加,而张家口  $ET_0$  上升主要归因于相对湿度的减小。而  $ET_0$  下降的站点中,有 10 个站点主要原因为平均风速的增大,分布在冀东沿海地区及冀中及冀北地区,在数量上占绝对优势。日照时数的减少仍是围场  $ET_0$  下降的主要原因,石家庄、遵化和青龙  $ET_0$  下降则

主要归因于相对湿度的增加。

冬季,张北、蔚县、石家庄和青龙  $ET_0$  上升的主导因子均为平均气温的增加,而邢台、围场和饶阳地

区  $ET_0$  上升的主要原因分别为最低气温、日照时数的增加及平均风速的减小。其余 11 个站点  $ET_0$  均呈下降趋势,均主要归因于平均风速的减小。

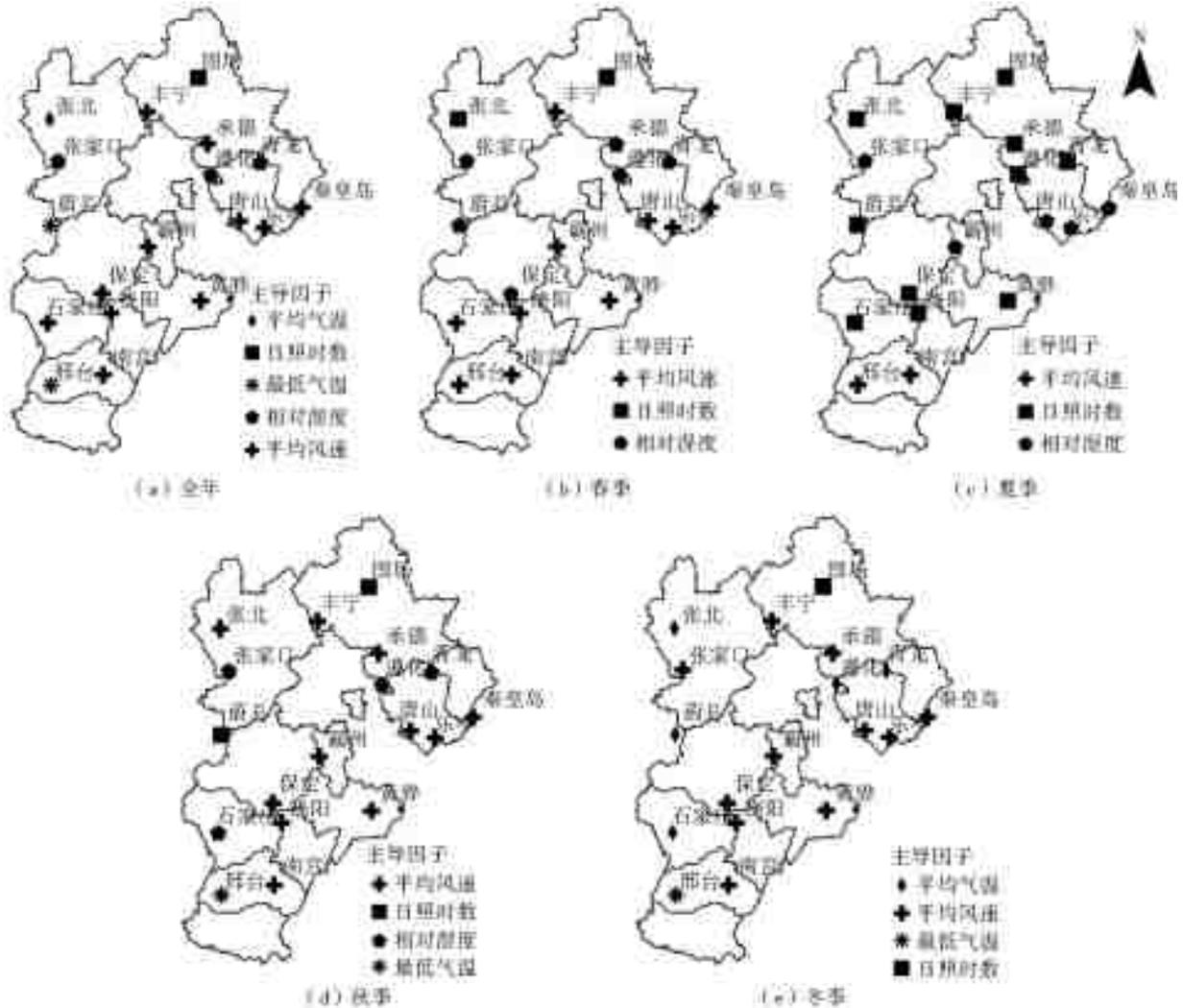


图 6 潜在蒸散量变化主导因子的空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of dominant factors for potential evapotranspiration

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1) 近 57 年来河北省  $ET_0$  多年平均值为 1 095.70 mm,整体呈显著下降趋势,平均下降幅度为  $-8.91 \text{ mm}/(10\text{a})$ , $ET_0$  年内变化夏季最高,冬季最低; $ET_0$  高值分布区在河北省西北部的张北、蔚县及丰宁一带,大致自西向东呈半环状递减趋势,四季  $ET_0$  空间分布与年尺度格局基本一致。

(2) 各气象因子对  $ET_0$  的敏感性分析中,整体上河北省年平均  $ET_0$  对相对湿度表现为负敏感,对其他气象因子表现为正敏感。且  $ET_0$  年变化对各气象因子的敏感程度依次为相对湿度 > 最高气温 > 平均风速 > 日照时数 > 平均气温 > 最低气温。此

外, $ET_0$  年变化对日照时数及平均气温的正敏感性有所减弱,相对湿度的负敏感性显著增强;空间分布上,河北省 18 个站  $S_{WS}$ 、 $S_{SH}$  和  $S_{HT}$  均为正值, $S_{RH}$  均为负值,而  $S_{LT}$  和  $S_{AT}$  则正负各异。

(3) 河北省年平均  $ET_0$  变化的主导因子为平均风速,其次为日照时数。空间分布上,影响  $ET_0$  变化主导因子的空间分布与敏感系数分布有所差异。引起西北部地区年平均  $ET_0$  变化的主导因子为平均气温,东北部地区为日照时数,中南部及沿海地区  $ET_0$  变化的主导因子为平均风速。

#### 3.2 讨论

河北省气温的升高并未导致潜在蒸散量的增加,关于  $ET_0$  随时间变化的研究结果及其变化的气候成因与已有学者对河北省及华北平原的研究成

果<sup>[7-8,11]</sup>一致,表明“蒸发悖论”现象在河北省得到广泛关注 and 验证。

敏感性分析可以获得  $ET_0$  对气象因子变化的定量响应关系,结合气象因子对  $ET_0$  变化的贡献水平可以进一步识别影响河北省潜在蒸散量变化的主导因子,通过分析发现,平均风速及日照时数的减小为河北省潜在蒸散量下降的主要原因。其中,造成河北省平均风速下降的自然原因可能为近几十年东亚季风的减弱,大尺度环流场的改变带来的近地面平均风速的减弱<sup>[34]</sup>。人为原因一方面与城市化发展影响有关,另一方面,也与近 50 年来两代塞罕坝务林人员成功营造 7.47 万  $hm^2$  人工林林海,森林覆盖率由建厂初期的 11.4% 提高至现在的 80% 有关。对于日照时数的减少,任国玉等<sup>[31]</sup>观测表明主要与人为排放的气溶胶浓度(特别是硫酸盐和黑碳气溶胶)增加导致华北雾日和低层云量增多有关。

由于本文尚未定量化计算分析大气环流的年际变化、下垫面的均一性以及人类活动均对  $ET_0$  变化的影响,因此,本文研究结果存在一定程度的局限性。

#### 参考文献(References):

- [1] 李媛,谢应忠,王亚娟. 宁夏中部干旱带潜在蒸散量变化及影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4680-4688. (LI Y, XIE Y Z, WANG Y J. Changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in the arid zone of central Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4680-4688. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201501060035.
- [2] 丁一汇. 中国气候变化科学概论[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 128. (DING Y H. Introduction to China's climate change science[M]. Beijing: Meteorology Press, 2008: 128. (in Chinese))
- [3] THOMAS A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. [J]. International Journal of Climatology, 2015, 20(4): 381-396. DOI: 10. 1002/(SICI) 1097-0088(20000330) 20: 4 <381::AID-JOC477> 3. 0. CO; 2-K.
- [4] 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. (WANG J, LYU X, WANG J L. Temporal and spatial variation characteristics of reference crop evapotranspiration in northern Xinjiang [J]. Journal of arid meteorology, 2015, 33(1): 63-69. (in Chinese)) DOI: 10. 11755/j. issn. 1006-7639(2015)-01-0063.
- [5] 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 Y J, CAO J F, XIONG M M, et al. Quantitative analysis of meteorological factors affecting reference crop evapotranspiration in Haihe River basin [J]. Journal of arid meteorology, 2017, 35(3): 367-373. (in Chinese)) DOI: 10. 11755/j. issn. 1006-7639(2017)-03-0367.
- [6] 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 P T, YAN J P, JIANG C, 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)) DOI: 10. 5846/stxb201312022869.
- [7] PETERSON T C, GOLUBEV V S, GROISMAN P Y. Evaporation losing its strength [J]. Nature, 1995, 377(6551): 687-688. DOI: 10. 1038/377687b0.
- [8] RODERICK M L, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science, 2002, 298(5597): 1410-1411. DOI: 10. 1126/science. 1075390.
- [9] 张可慧,刘剑锋,刘芳圆,等. 河北省潜在蒸发量计算与变化趋势分析[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(6): 75-78. (ZHANG K H, LIU J F, LIU F Y, et al. Analysis of potential evaporation calculation and change trend in Hebei Province [J]. Geography and Geographic Information Science, 2010, 26(6): 75-78. (in Chinese)) DOI: cnki: sun: dlgt. 0. 2010-06-020.
- [10] 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. (DONG X G, GU W Z, WANG J, et al. Quantitative analysis of climate factors for potential evapotranspiration changes in Shandong [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 810-823. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2015. 05. 009.
- [11] 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 C M, ZHANG D. 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)) DOI: 10. 11821/xb201105001.
- [12] 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. (CONG Z T, NI G H, YANG D W, et al. Analysis of the law of "Evaporation Paradox" in China [J]. Progress of Hydrology, 2008, 19(2): 147-152. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2008. 02. 001.
- [13] 姬兴杰,朱业玉,顾万龙. 河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析[J]. 中国农业气象, 2013, 34

- (1):14-22. (JI X J,ZHU Y Y,GU W L. Analysis on trends in annual reference crop evapotranspiration and its impact climatic factors in Henan Province during 1971 to 2010[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(1):14-22. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2013.01.003.
- [14] 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. (WANG R Y,LI X,CHEN R M,et al. Spatial and temporal variation of reference crop evapotranspiration in Hengshui [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(3):294-300. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2013.03.007.
- [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. (PU Z C,ZHANG S Q. Study on spatial-temporal variation characteristic of summer half year  $ET_0$  in recent 48 years in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2011,32(1):67-72. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2011.01.013.
- [16] MCCUEN R H. sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*,1974,10(3):486-497. DOI:10.1111/j.1752-1688.1974.tb00590.x.
- [17] 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 L H, SONG K S, ZHANG B,et al. Sensitive analysis on reference evapotranspiration to key meteorological factors in north-east China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2013,31(1):11-18. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2010.01.003.
- [18] 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. (CAO W,SHEN S H,DUAN C F. Sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration in the growing season of northwest China in recent 49 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2011,32(3):375-381. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2011.03.010.
- [19] 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. (LIU Q,YAN C R,ZHAO C X,et al. Analysis of potential evapotranspiration and analysis of meteorological sensitive factors in the Yellow River basin[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(17):157-166. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.17.021.
- [20] 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 X D,MA X Q,XU Y,et al. Analysis of variation characteristics of reference crop evapotranspiration and contribution of main meteorological factors in Huaihe River basin [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(6):661-667. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2013.06.007.
- [21] 车少静,李春强,申双和.基于SPI的近41年(1965—2005)河北省旱涝时空特征分析[J].中国农业气象,2010,31(1):137-143. (CHE S J,LI C Q,SHEN S H. Temporal and spatial characteristics of drought and flood in Hebei Province in recent 41 years (1965-2005) Based on SPI[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2010,31(1):137-143. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2010.01.027.
- [22] 邹海平,陈汇林,田光辉,等.海南岛参考作物蒸散量时空变化特征及成因分析[J].中国农业气象,2018,39(1):18-26. (ZOU H P,CHEN H L,TIAN G H,et al. Temporal and spatial variation characteristics and causes of reference crop evapotranspiration in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2018,39(1):18-26. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.01.003.
- [23] 李春强.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. (LI C Q. Temporal and spatial variation of reference crop evapotranspiration in Hebei Province in the past 35 years (1965-1999)[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2008,29(4):414-419. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2008.04.008.
- [24] 李丽君,刘玉甫,王蓓,等.浅谈采用彭曼—蒙特斯公式计算参照作物需水量[J].中国西部科技,2008,7(15):9-10. (LI L J,LIU Y F,WANG B,et al. Discussion on calculating reference crop water requirement by using Penman-Montes formula[J]. Western China Science and Technology,2008,7(15):9-10. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1671-6396.2008.15.004.
- [25] 梁丽乔,李丽娟,张丽,等.松嫩平原西部生长季参考作物蒸散量的敏感性分析[J].农业工程学报,2008,24(5):1-5. (LIANG L Q,LI L J,ZHANG L,et al. Sensitivity of the reference crop evapotranspiration in growing season in the west Songnen Plain[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(5):1-5. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.2008.05.001.

- [26] 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 C X, MEI X R, JU H, et al. Changes of potential evapotranspiration and sensitivity to climatic factors in various agricultural sub-regions of the Huang-Huai-Hai Plain [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36 (5): 570-577. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2015. 05. 006.
- [27] 钱多,查天山,吴斌,等.毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J].生态学报,2017,37(6):1966-1974. (QIAN D, ZHA T S, WU B, et al. Analysis of variation characteristics and genesis of reference crop evapotranspiration in Mu Us Sandland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (6): 1966-1974. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201510182101.
- [28] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:63-66. (WEI F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: Meteorology Press, 2007: 63-66. (in Chinese))
- [29] 汤国安,杨昕,等.地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科技出版社,2012:289-291. (TANG G A, YANG X, et al. GIS spatial analysis experiment tutorial [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2012: 289-291. (in Chinese))
- [30] 张素云.近 47 a 河北省风速演变特征[D].南京:南京信息工程大学,2011. (ZHANG S Y. Characteristics of wind speed evolution in Hebei Province in recent 47 a [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. y1891447.
- [31] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005,63(6):942-956. (REN G Y, GUO J, XU M Z, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63 (6): 942-956. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0577-6619. 2005. 06. 011.
- [32] 马晓燕.外部强迫因子对气候变化影响的数值试验研究[D].北京:中国科学院大气物理研究所,2002. (MA X Y. Numerical experimental study on the influence of external forced factors on climate change [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences Institute of Atmospheric Physics, 2002. (in Chinese))
- [33] 赵宗慈,王绍武,徐影,等.近百年我国地表气温趋势变化的可能原因[J].气候与环境研究,2005,10(4):808-817. (ZHAO Z C, WANG S W, XU Y, et al. Possible reasons for the change of surface temperature trend in China in the past 100 years [J]. Climate and environmental research, 2005, 10 (4): 808-817. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-9585. 2005. 04. 012.
- [34] 曹永强,高璐,袁立婷,等.辽宁省潜在蒸散发量及其敏感性规律分析[J].地理科学,2017,37(9):1422-1429. (CAO Y Q, GAO L, YUAN L T, et al. Analysis of potential evapotranspiration and its sensitivity law in Liaoning Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37 (9): 1422-1429. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2017. 09. 015.

(上接第 30 页)

- [26] 王建华,姜大川,肖伟华,等.水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J].水利学报,2017,48(12):1399-1409. (WANG J H, JIANG D C, XIAO W H, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: Definition and scientific topics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (12): 1399-1409. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20170651.
- [27] 王锦,郝晋珉,陈爱琪,等.基于模糊聚类分析的天津市生态环境承载力评价[J].中国农业大学学报,2018,23(10):112-121. (WANG J, HAO J M, CHEN A Q, et al. Evaluation of ecological environment carrying capacity in Tianjin based on fuzzy cluster analysis [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(10): 112-121. (in Chinese)) DOI: 10. 11841/j. issn. 1007-4333. 2018. 10. 14.
- [28] 李辉,金菊良,吴成国,等.基于联系数的安徽省水资源承载力动态诊断评价研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):42-49. (LI H, JIN J L, WU C G, et al. Dynamic evaluation and diagnostic analysis for water resources carrying capacity in Anhui province based on connection number [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 42-49. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 20180007.