

# 河北省潜在蒸散发的气候敏感性

张殷钦<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸

<sup>2</sup>河北工程大学河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸

收稿日期: 2023年1月22日; 录用日期: 2023年2月13日; 发布日期: 2023年2月24日

## 摘要

为揭示河北省潜在蒸散发( $ET_0$ )对气象因子的敏感程度, 本文基于河北省12个气象站1970~2012年的气象资料, 运用Penman-Monteith公式和Beven敏感性系数公式, 开展了 $ET_0$ 对气象要素的敏感性分析。结果表明: 河北省多年平均年 $ET_0$ 值为1007.7 mm,  $ET_0$ 对各气象要素的敏感水平大小分别为: 湿度 > 风速 > 日照 > 气温。其中 $ET_0$ 对湿度的敏感系数小于0, 而对风速、日照和气温的敏感系数均大于0。从季节上来看, 春、秋、冬三季,  $ET_0$ 对风速和湿度比较敏感; 夏季,  $ET_0$ 对日照和湿度比较敏感。在空间分布上, 河北省东北部地区和西北部地区的 $ET_0$ 分别对气温和风速的敏感性较强; 而东南部地区和西南部地区的 $ET_0$ 分别对湿度和日照的敏感性较强。

## 关键词

潜在蒸散量, Penman-Monteith公式, Beven敏感性系数, 河北省

# Climate Sensitivity of Potential Evapotranspiration in Hebei Province

Yinqin Zhang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Water and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

<sup>2</sup>Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Feb. 13<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 24<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

To reveal the sensitivity of potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) to meteorological factors in Hebei

文章引用: 张殷钦. 河北省潜在蒸散发的气候敏感性[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(2): 247-254.

DOI: 10.12677/ccrl.2023.122025

Province, Penman-Monteith formula and Beven sensitivity coefficient formulae were used to study the sensitivity analysis of  $ET_0$  to various meteorological elements based on the meteorological data of 12 stations from 1970 to 2012. Results indicated that the average annual  $ET_0$  value of Hebei province was 1007.7 mm in the past 43 years, and the sensitivity level of  $ET_0$  to various meteorological elements was humidity > wind speed > sunshine > temperature. The sensitivity coefficient of  $ET_0$  to humidity was less than 0, while the sensitivity coefficients of  $ET_0$  to wind speed, sunshine and temperature were all greater than 0. On a seasonal scale,  $ET_0$  was highly sensitive to wind speed and humidity in spring, autumn and winter. In summer,  $ET_0$  was highly sensitive to sunshine and humidity. In terms of spatial distribution, the northeastern region and the northwestern region of Hebei province were highly sensitive to the temperature and wind speed respectively. The southeast and the southwest were sensitive to humidity and sunshine separately.

## Keywords

Potential Evapotranspiration, Penman-Monteith Formula, Beven Sensitivity Coefficient, Hebei Province

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

潜在蒸散发( $ET_0$ )也被称为蒸发潜力, 它表示在一定的外界条件下, 供水没有限制时, 下垫面可以达到的最大蒸发蒸腾量, 是权衡一个区域蒸发潜力的重要指标[1]。不同气象因子的变化对  $ET_0$  的影响大小不同, 除此之外, 使用不同的  $ET_0$  模型及其方程, 其结果所展示的  $ET_0$  对各气象因子的敏感程度也存在着显著差异。为此, 近些年来, 国内外相关学者开展了  $ET_0$  对气象因子的敏感性分析研究, 也有不少学者致力于不同  $ET_0$  估算方程对气候变化的敏感性分析研究。Gong 等[1]的研究表明  $ET_0$  对其最敏感的气象因子是湿度, 其次是大气辐射和气温, 而敏感程度最低的气象因子是风速。Goyal [2]发现在印度地区,  $ET_0$  对大气辐射和气温的敏感程度比较高,  $ET_0$  随大气辐射和气温的增加而增加。刘昌明等[3]对中国地区的  $ET_0$  气候敏感性进行了探究, 并由此对中国地区的  $ET_0$  气候敏感性做了地域划分。作者指出在中国的北部地区,  $ET_0$  对最高气温的敏感水平比较高, 而在南部地区  $ET_0$  对实际水汽压的敏感水平比较高。刘小莽等[4]通过分析海河流域  $ET_0$  对各种气象因子如太阳辐射、气温、水汽压和风速的敏感性及其时空分布规律, 得知  $ET_0$  对水汽压最敏感, 其次是大气辐射和气温, 而敏感性系数最低的气象因子是风速。卞瑶等[5]的研究表明我国不同分区的风速大小存在不同程度的差异。Xu 等[6]采用了与 Gong 等[1]不同的分析方法(Gong 等用的是相对变化率的方法, 而 Xu 等用的是相对百分比的方法)阐明了长江流域  $ET_0$  对各气象因子的敏感程度, 结果发现两种方法所得的结论大致相同, 即  $ET_0$  对湿度的敏感性系数最高, 对风速的敏感性系数最低。王新华等[7]计算了西北干旱地区的  $ET_0$ , 旨在比较 Hargreaves 法和 Penman-Monteith 法的异同。Bormann [8]分析了德国多个气象站的长期气候数据, 比较了 18 种不同的  $ET_0$  模型(如 Priestley-Taylor 法、Penman 法等)对所观察到的气候变化的敏感性。结果表明, 使用不同的  $ET_0$  模型及其方程对观测到的气候变化的敏感性存在着显著的差异。

河北省位于华北平原, 属温带大陆性季风气候, 四季分明, 且地区气候条件差异较大, 干旱化程度明显, 水资源的禀赋条件严重制约着农业的可持续发展[9]。为此, 开展区域  $ET_0$  的驱动因子分析研究对

科学管理水资源具有重要的指导意义。本文基于河北省 12 个气象站 1970~2012 年共 43 年的气象数据资料,开展  $ET_0$  对各气象因子的敏感性分析,旨在为阐明河北省  $ET_0$  气候敏感性的变化提供科学支撑。

## 2. 数据来源与研究方法

### 2.1. 数据来源

本文所采用的气象数据来源于中国气象数据网,考虑到数据序列长度的一致性,选取了河北省 12 个气象站点 1970~2012 年的逐日气温、日照、湿度、距地面 10 m 高的风速等气象资料。气象站点的地理位置分布如图 1 所示。

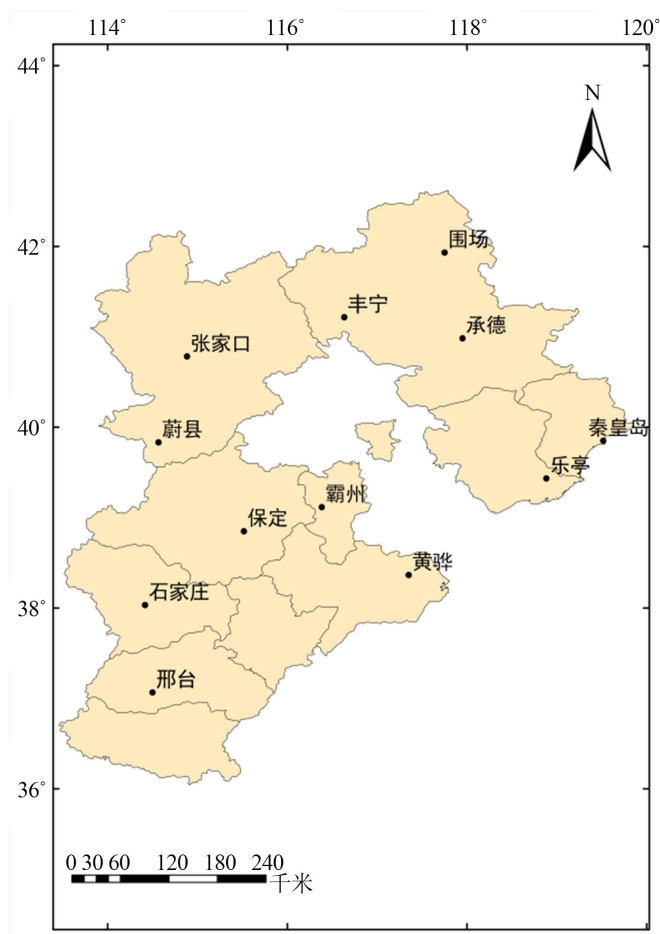


Figure 1. Location of meteorological stations in Hebei Province  
图 1. 河北省气象站点位置

### 2.2. Penman-Monteith 公式

估算  $ET_0$  的方法多种多样,其中 FAO 在 1998 年给出的 Penman-Monteith 公式综合了多种气象因子的影响。故本文采用 Penman-Monteith 公式[10] [11]进行河北省  $ET_0$  的估算。具体公式如下:

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

式中： $ET_0$ 为潜在蒸散发，mm/d； $R_n$ 为净辐射，MJ/(m<sup>2</sup>·d)； $G$ 为土壤热通量，MJ/(m<sup>2</sup>·d)； $\gamma$ 为干湿常数，kPa/°C； $\Delta$ 为饱和水汽压曲线斜率，kPa/°C； $U_2$ 为2 m 高处的风速，m/s； $e_s$ 为平均饱和水汽压，kPa； $e_a$ 为平均实际水汽压，kPa； $T_{mean}$ 为平均气温，°C。

### 2.3. 气候敏感性系数的计算方法

气候敏感性系数是衡量气象因子变化(如日照、湿度等)对潜在蒸散发影响的一个关键指标。本文采用局部灵敏度分析方法即 Beven 敏感性系数公式[12]计算  $ET_0$  对各气象因子的敏感性系数。该公式定义了气候敏感性系数为  $ET_0$  变化率与气象因子变化率的比值，公式为：

$$S_x = \lim_{\Delta x/x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta x / x} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial x} \frac{x}{ET_0} \quad (2)$$

式中： $S_x$ 为  $ET_0$  关于气象因子  $x$  的敏感性系数，无量纲； $\Delta ET_0$  为潜在蒸散量的变化率，无量纲； $\Delta x$  为气象因子的变化率，无量纲。

Beven 敏感性系数公式的优点是其把各种气象因子变成了无量纲的数值，这有利于不同的气象因子进行更加直观的比较，这种方法在  $ET_0$  的气候敏感性分析中得到了普遍使用。敏感性系数的绝对值的大小反映气候因子对  $ET_0$  的影响大小。若  $ET_0$  对某气象因子的敏感性系数为负数，则说明该气象因子增加，所对应的  $ET_0$  就会减少。若敏感性系数为 0.5，则当气象因子每增大 10%，所对应的  $ET_0$  就会增大 5%。

## 3. 结果分析

### 3.1. 气候敏感性系数的年内变化

#### 3.1.1. 日敏感系数年内变化

图 2 给出了河北省多年平均日敏感系数年内变化，从图中可以看出， $ET_0$  对日照和气温的敏感性系数在一年的大部分时间里是正值。 $ET_0$  对风速全年呈正敏感性。这说明  $ET_0$  是随着日照、气温、风速这三个气象因子的增大而增大的。与之相反， $ET_0$  对湿度的敏感性系数全年是负数，这说明湿度增大，则  $ET_0$  减小。

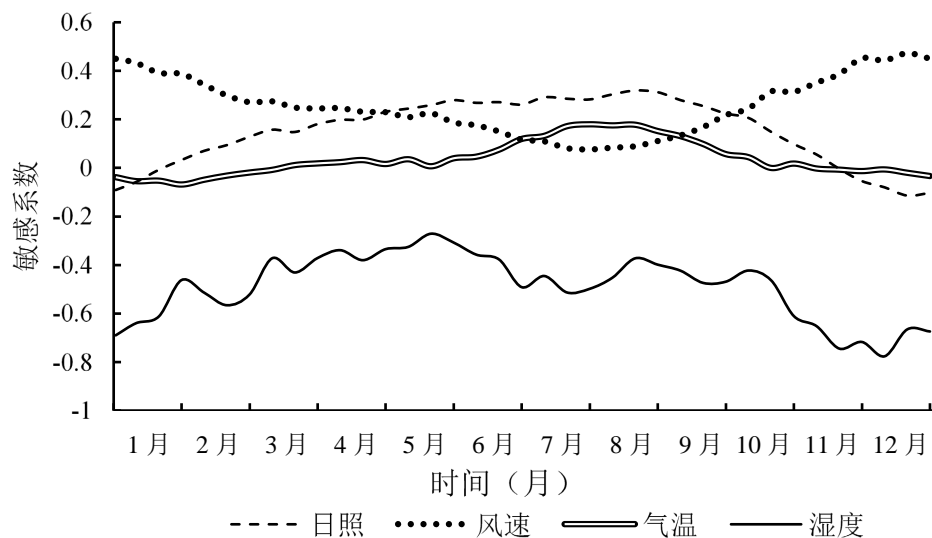


Figure 2. Annual variation of mean daily sensitivity coefficient in Hebei Province

图 2. 河北省多年平均日敏感系数年内变化

### 3.1.2. 月敏感系数年内变化

从表 1 中可以看出,  $ET_0$  对这四个气象因子的敏感性系数的年内变化,  $ET_0$  对日照的敏感性系数在一年内的趋势是先增后减, 在一月份,  $ET_0$  对日照的敏感性系数是负值, 之后随着月份的增加, 敏感性系数也逐渐增加, 在八月份的时候达到最大值, 其值为 0.31。之后敏感性系数随着月份的增加而减少, 在十一月份的时候绝对值达到最小值, 其值为 0。整体  $ET_0$  对日照的敏感性系数变化在 -0.1 至 0.31 之间, 年平均值为 0.16。 $ET_0$  对风速的敏感性系数在一年内的趋势是先减后增, 全年为正值, 从一月份开始, 敏感性系数逐月减小, 在八月份到达最小值, 其值为 0.09。随后, 敏感性系数逐渐上升, 在十二月份的时候达到最大值, 其值为 0.46。整体  $ET_0$  对风速的敏感性系数变化在 0.09 至 0.46 之间, 年平均值为 0.26。 $ET_0$  对气温的敏感性系数在一年内的变化较为缓和, 趋势是先增后减, 从一月份开始, 敏感性系数逐月增加, 三月份的时候绝对值达最小值, 其值为 0。逐月增加至八月份, 达到最大值, 其值为 0.17。整体  $ET_0$  对气温的敏感性系数变化在 -0.05 至 0.17 之间, 年平均值为 0.04。 $ET_0$  对湿度的敏感性系数全年是负数, 其绝对值的全年变化大致趋势为先减后增, 从一月份开始, 敏感性系数绝对值逐月减小, 在五月份达到最小值, 其值为 -0.34。随后, 敏感性系数绝对值逐渐上升, 在十二月份的时候达到最大值, 其值为 -0.72。整体  $ET_0$  对湿度的敏感性系数变化在 -0.72 至 -0.34 之间, 年平均值为 -0.48。

**Table 1.** Annual average monthly sensitivity coefficient in Hebei Province

**表 1.** 河北省多年平均月敏感系数

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均
日照	-0.03	0.09	0.16	0.21	0.25	0.28	0.30	0.31	0.27	0.15	0.00	-0.10	0.16
风速	0.42	0.32	0.26	0.24	0.20	0.16	0.10	0.09	0.17	0.29	0.40	0.46	0.26
气温	-0.05	-0.04	0.00	0.02	0.03	0.06	0.15	0.17	0.10	0.02	-0.01	-0.02	0.04
湿度	-0.60	-0.51	-0.41	-0.36	-0.34	-0.36	-0.45	-0.42	-0.41	-0.51	-0.68	-0.72	-0.48

### 3.1.3. 季敏感系数年内变化

从表 2 中可以看出, 在年平均尺度上,  $ET_0$  对湿度的敏感程度最大, 对气温的敏感程度最小, 整体上,  $ET_0$  对各气象因子的敏感水平大小分别为: 湿度 > 风速 > 日照 > 气温。从季节上来看, 春季,  $ET_0$  对各气象因子的敏感水平大小分别为: 湿度 > 风速 > 日照 > 气温; 夏季, 敏感水平大小分别为: 湿度 > 日照 > 气温 > 风速; 秋季, 分别为: 湿度 > 风速 > 日照 > 气温; 冬季, 分别为: 湿度 > 风速 > 气温 > 日照。整体上, 春、秋、冬三季,  $ET_0$  对风速和湿度的敏感程度相对较大; 而夏季  $ET_0$  对日照和湿度敏感程度大。

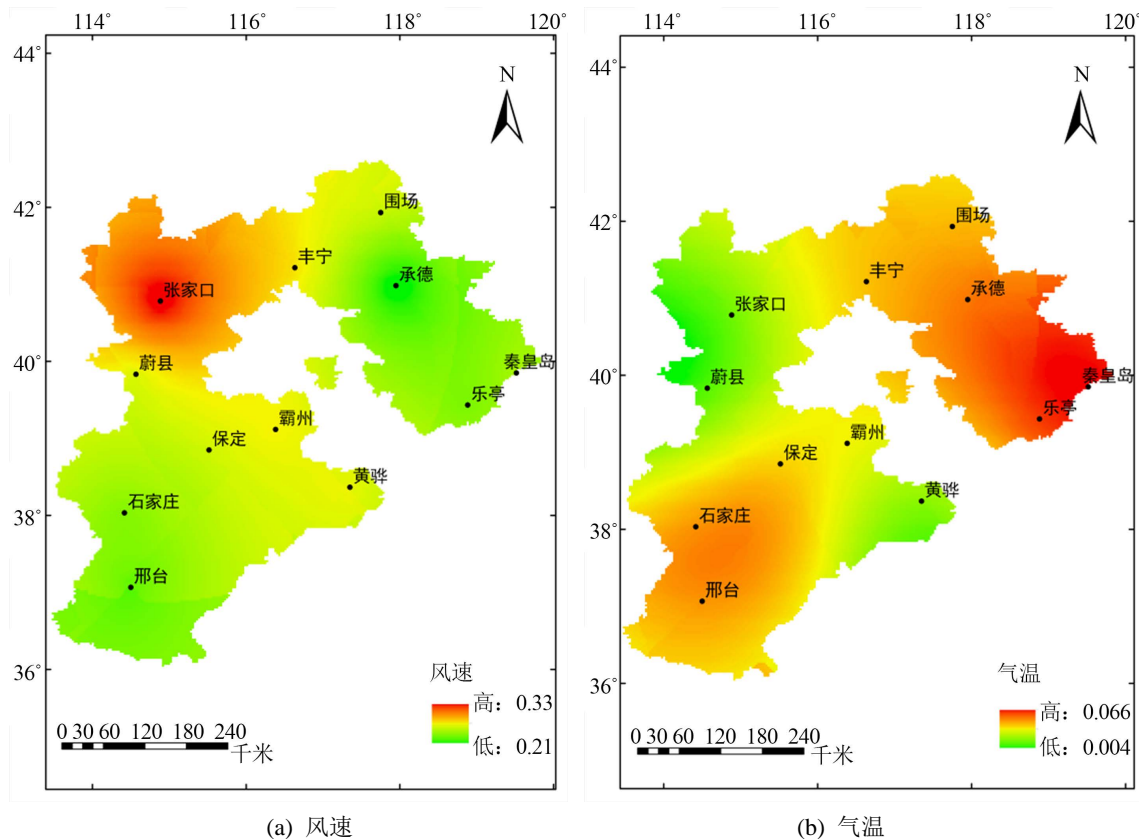
**Table 2.** Annual average seasonal sensitivity coefficient in Hebei Province

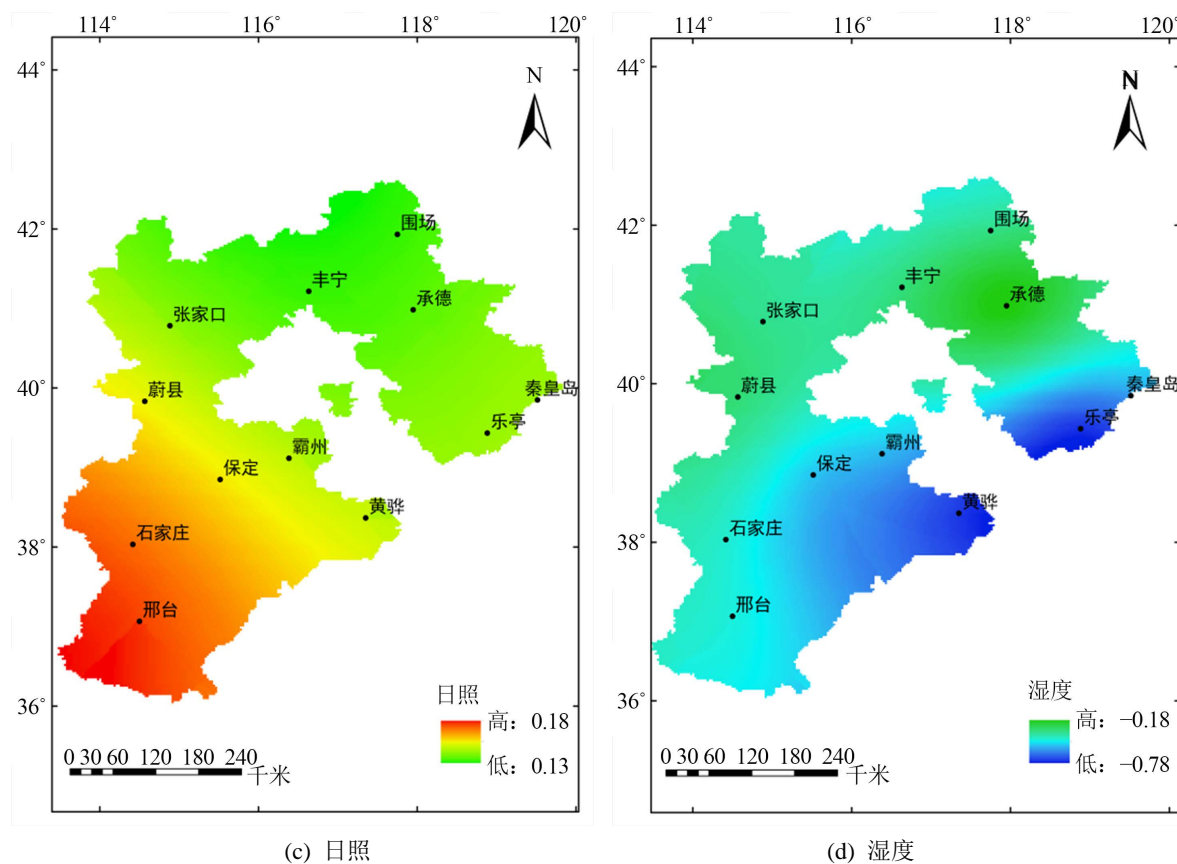
**表 2.** 河北省多年平均季敏感系数

	日照	风速	气温	湿度
春季	0.21	0.24	0.02	-0.37
夏季	0.30	0.12	0.13	-0.41
秋季	0.14	0.28	0.04	-0.53
冬季	-0.01	0.40	-0.04	-0.61
年均	0.16	0.26	0.04	-0.48

### 3.2. 气候敏感性系数的空间分布

本节对河北省 12 个气象测站的四种  $ET_0$  气象因子敏感性系数进行空间上的对比, 用 ArcGIS 软件绘制出河北省  $ET_0$  对各气象因子敏感性系数的空间分布图, 以用来反映气候敏感性系数的空间分布情况, 具体分布见图 3。从图 3 可以直观看出  $ET_0$  对各气象因子的敏感系数在空间上具有鲜明的地域特征, 整体呈片状或带状分布。具体来讲,  $ET_0$  对风速的敏感性系数空间分布表现为从河北省西北部的张家口草原, 到河北省东部乐亭地区和南部的邢台地区, 敏感性系数呈逐渐减小的趋势。位于河北省中部的保定、霸州、黄骅地区, 敏感性系数处于中间值。 $ET_0$  对风速最敏感的地区是张家口, 敏感性系数达到了 0.32,  $ET_0$  对风速敏感程度最差的地区是承德, 敏感性系数为 0.21。 $ET_0$  对气温的敏感性系数空间分布表现为河北省东部秦皇岛、乐亭地区敏感性系数较高, 北部的围场、承德地区和南部的石家庄、邢台地区次之, 东南部的黄骅地区和西北部的张家口、蔚县地区敏感性系数最低。其中,  $ET_0$  对气温最敏感的地区是秦皇岛, 敏感性系数达到了 0.07,  $ET_0$  对气温敏感性最差的地区是蔚县, 敏感性系数为 0.01。 $ET_0$  对日照的敏感性系数空间分布呈比较明显的带状, 整体从河北省西南部的邢台、石家庄地区到东北部的围场、承德、秦皇岛地区, 其敏感性系数值呈逐渐减小的趋势。其中,  $ET_0$  对日照最敏感的地区是蔚县, 敏感性系数达到了 0.18,  $ET_0$  对日照敏感性最差的地区是张家口, 敏感性系数为 0.14。 $ET_0$  对湿度的敏感性系数空间分布也呈带状分布, 大致趋势是, 从河北省西北部的张家口地区到东南部的乐亭、黄骅地区, 敏感性系数的绝对值逐渐增加。其中,  $ET_0$  对湿度最敏感的地区是乐亭, 敏感性系数达到了 -0.78,  $ET_0$  对湿度敏感性最差的地区是承德, 敏感性系数为 -0.18。综上所述, 河北省  $ET_0$  对各气象因子敏感性系数的空间分布不均匀, 具有鲜明的地域特征, 具体原因与各地的地理位置、海拔、气候、下垫面情况、植被类型等都有关系。





**Figure 3.** Spatial distribution of sensitivity coefficients of  $ET_0$  to meteorological factors in Hebei Province  
**图 3.** 河北省  $ET_0$  对各气象因子敏感性系数的空间分布

#### 4. 结论

本文基于河北省 12 个站点 43 年的气象资料, 运用 Penman-Monteith 公式和 Beven 敏感性系数公式开展了  $ET_0$  对各气象因子的敏感性剖析探究。得出如下结论:

1) 自 1970 年至 2012 年这 43 年来, 河北省整体的年  $ET_0$  大致在 900 mm 至 1130 mm 之间波动, 整体呈下降趋势。

2)  $ET_0$  对日照和气温的敏感性系数在一年的大部分时间里是正数,  $ET_0$  对风速的敏感性系数全年是正数, 而  $ET_0$  对湿度的敏感性系数全年是负数。

3) 从季节上来看, 春季,  $ET_0$  对各气象因子的敏感水平大小分别为: 湿度 > 风速 > 日照 > 气温; 夏季, 分别为: 湿度 > 日照 > 气温 > 风速; 秋季, 分别为: 湿度 > 风速 > 日照 > 气温; 冬季, 分别为: 湿度 > 风速 > 气温 > 日照。

4) 从空间分布上来看, 河北省  $ET_0$  对各气象因子敏感性系数的空间分布不均匀, 具有鲜明的地域特征。河北省东北部地区和西北部地区分别对气温和风速的敏感性较强; 东南部地区和西南部地区分别对湿度和日照的敏感性较强。

#### 基金项目

河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019151); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目(21422304256)。

## 参考文献

- [1] Gong, L., Xu, C., Chen, D., *et al.* (2006) Sensitivity of the Penman-Monteith Reference Evapotranspiration to Key Climatic Variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin. *Journal of Hydrology*, **329**, 620-629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.027>
- [2] Goyal, R.K. (2004) Sensitivity of Evapotranspiration to Global Warming: A Case Study of Arid Zone of Rajasthan India. *Agricultural Water Management*, **69**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.03.014>
- [3] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588.
- [4] 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.
- [5] 卞瑶, 李兰, 方思达, 等. 1961~2017 年中国地区风速时空变化规律研究[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(6): 1088-1095.
- [6] Xu, C., Gong, L., Jiang, T., *et al.* (2006) Analysis of Spatial Distribution and Temporal Trend of Reference Evapotranspiration and Pan Evaporation in Changjiang Catchment. *Journal of Hydrology*, **327**, 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.029>
- [7] 王新华, 郭美华, 徐中民. 分别利用 Hargreaves 和 PM 公式计算西北干旱区  $ET_0$  的比较[J]. 农业工程学报, 2006(10): 21-25.
- [8] Bormann, H. (2011) Sensitivity Analysis of 18 Different Potential Evapotranspiration Models to Observed Climatic Change at German Climate Stations. *Climatic Change*, **104**, 729-753. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9869-7>
- [9] 肖春柳, 张兰霞, 曹永强, 等. 河北省潜在蒸散量变化特征及主导因子辨析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(6): 1-10.
- [10] 赵玲玲, 夏军, 王中根, 等. 北京潜在蒸散发量年内-年际的气候变化特征及成因辨识[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1911-1921.
- [11] 杨羽, 王侯浩, 朱瑶, 等. 近 40 年来四川盆地参考作物蒸散量时空特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(6): 1033-1040.
- [12] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 102-109.