

河北省春季潜在蒸散量变化特征与成因

曹永强, 肖春柳, 李元菲, 刘明阳

(辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:潜在蒸散量(ET_0)是区域能量平衡和水分平衡的重要组成部分,通过探讨其历史演化规律及成因对优化调整农业生产结构及水资源合理配置至关重要。基于河北省及周边地区 1968—2018 年 24 个典型气象站点逐日气象数据,利用 Penman-Monteith 模型、敏感性分析、M-K 检验法及空间插值方法分析了河北省 ET_0 时空分布特征及其影响因素。结果表明:(1)从时间分布来看,51 年间,河北省春季 ET_0 多年均值为 353.20 mm,呈下降趋势,下降幅度为 -1.679 mm/10 a,其周期变化存在 35 年主周期及 20 年次周期;空间上呈现由西北向东南半环状递减趋势。(2)从影响因素来看,春季 ET_0 变化对平均气温、最高气温、最低气温、日照时数和平均风速均表现正敏感;对相对湿度表现为负敏感,对各个气象因子敏感程度依次为相对湿度>最高气温>日照时数>平均风速>平均气温>最低气温。(3)从成因的空间分布上看,河北省北部地区 ET_0 变化的主导气候影响因子为平均气温,中部及西部地区为相对湿度,南部及偏东部地区则转变为平均风速。研究成果可为研究区水资源综合评价及农业生产工作提供一定参考。

关键词:潜在蒸散量;时空特征;敏感性分析;春季河北省

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0195-07

Characteristics and Causes of Potential Evapotranspiration in Spring in Hebei Province

CAO Yongqiang, XIAO Chunliu, Li Yuanfei, Liu Mingyang

(College of City and Environment, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: Potential evapotranspiration (ET_0) is an important part of regional energy balance and water balance. It is very important to optimize and adjust agricultural production structure and rational allocation of water resources by discussing its historical evolution rules and causes. Based on the daily meteorological data of 24 typical meteorological stations in Hebei Province from 1968 to 2018, the spatial and temporal distribution of ET_0 in Hebei Province and its influencing factors were analyzed by using Penman-Monteith model, sensitivity analysis, M-K test method and spatial interpolation method. The results are as follows. (1) From the point of time distribution, the annual mean value of ET_0 in spring in Hebei Province is 353.20 mm in 51 years, with a decreasing trend of -1.679 mm/decade, and its periodic variation has 35-year main cycle and 20-year cycle; The changes of ET_0 in spring are positively sensitive to mean air temperature, maximum temperature, minimum temperature, sunshine duration and mean wind speed from the northwest to the southeast. (2) In terms of influencing factors, the variation of ET_0 in spring is positively sensitive to the mean temperature, the maximum temperature, the lowest temperature, the sunshine duration and the average wind speed. The sensitivity to the relative humidity is negative, and the sensitivity to various meteorological factors follows the order: relative humidity> maximum temperature> unshine hours> mean wind speed> mean temperature> minimum temperature. (3) From the spatial distribution of the causes, the dominant climatic factors of ET_0 change in northern Hebei Province are mean temperature, relative humidity in central and western regions, and mean wind speed in southern and eastern regions. The research results can provide scientific guidance for the comprehensive evaluation of water resources and the actual agricultural production.

Keywords: potential evapotranspiration; spatiotemporal characteristics; sensitivity analysis; spring; Hebei Province

潜在蒸散量 (potential evapotranspiration, ET_0) 是指水分供应不受限制时某一固定下垫面可能达到的最大蒸散量^[1]。作为地球水文循环过程中的重要环节,潜在蒸散量在水循环中最直接受土地利用和气候变化的影响^[2],也是土壤层水分变化的重要指标。已成为多个研究领域的热点问题。 ET_0 异常变化常常会影响地区水热平衡及气候的干湿状况,深入影响地区发展及水资源配置及农业发展。

目前关于 ET_0 计算方法多是应用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式,该公式将大气物理特性及植被生理特性全部考虑在内,具有充分物理性依据,有利于更加清楚地了解 ET_0 变化过程及影响机制^[4]。随着全球气温不断上升加之差异用水结构中供用水端的水资源性短缺的矛盾均日益凸显,国内外学者对 ET_0 及其气候影响研究日益深入。梁丽乔等^[5] 研究发现松嫩平原西部年 ET_0 呈增加趋势,相对湿度和气温是影响 ET_0 变化的主要气候因子;李春强等^[6] 研究表明近 35 a 河北省 ET_0 呈逐年减少趋势,风速和日照时数是影响 ET_0 变化的主要气候因素;徐新良等^[7] 研究表明我国东北地区自 20 世纪 90 年代以来平均 ET_0 逐年增加,平均风速变化对 ET_0 有重要影响;史建国等^[8] 研究表明整个黄河流域自 1957 年以来 ET_0 呈“先下降,后稳定,再上升”的趋势变化,相对湿度是影响 ET_0 变动的重要因子。国外学者对 ET_0 的研究主要集中在其主导因子及其变动情况。就引起 ET_0 变动的因子,各派观点不一,Mevicar 等^[9] 认为在分析 ET_0 变化趋势时,应考虑日照时数和风速的影响。Chattopadhyay^[10-11] 等学者认为, ET_0 下降的主要原因是太阳辐射量的减少和北半球相对湿度的增加,二者的共同作用在很大程度上影响了 ET_0 变化。

河北省位于华北平原腹地,是我国重要粮食主产区之一,农业发展技术先进、良田面积广阔、发展潜力较大。但由于常年受旱涝、盐碱及风沙灾害和区域水资源短缺等问题影响,粮食生产变动性较大^[12]。当前关于地区春季 ET_0 变化及气象因子响应并不多见,春季是作物生长关键时期,且河北省春旱严重,土地含水量较低,对植物生长不利,应予以重点讨论及研究,因此,本文在前人研究基础上,以春季为研究对象,重点分析河北省春季 ET_0 变化特征及影响因素。

1 资料与方法

1.1 研究区域与数据

河北省位于华北平原南部,地势由西北向东南倾斜。春季平均气温 14.3°C ,平均降水量 104 mm ,降水量区域分布不均匀,由东南向西北逐渐较少。春季

气温回升快、降水量少,加之地面植被覆盖率较低,易出现阶段性气候干旱、大风沙尘天气,严重影响区域农业发展及水资源优化配置。

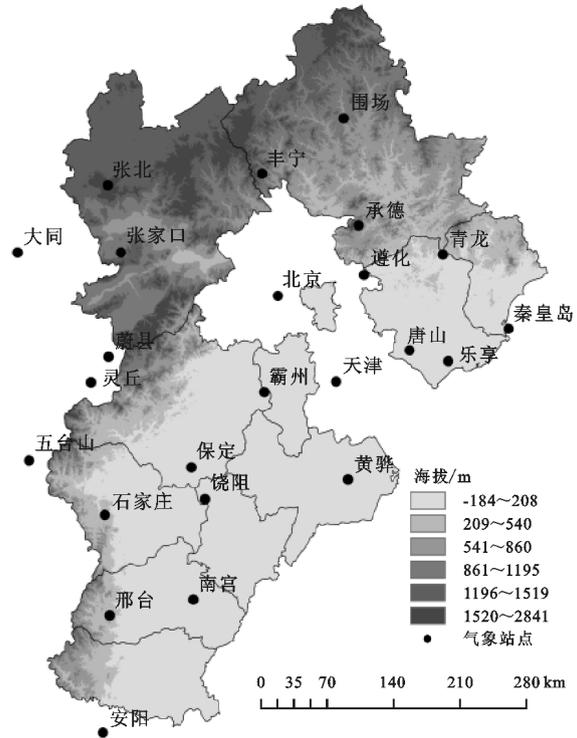


图 1 气象站点分布

气温回升快、降水量少,加之地面植被覆盖率较低,易出现阶段性气候干旱、大风沙尘天气,严重影响区域农业发展及水资源优化配置。

本文所用气象数据源于河北省 18 个气象站点的测资料,同时为保证结果分析的准确性,加入 6 个省外临近站点,共计 24 个站点。研究区概况详见图 1。

气象数据来源于中国气象数据网,选取 1968—2018 年逐日气象数据资料,季节划分以气象学研究为标准,即 3—5 月。

1.2 研究方法

1.2.1 潜在蒸散量 (ET_0) ET_0 受下垫面、气温及湿度等要素影响较大,一般由估算得出,其结果有很大变动性。许多学者一致认为:Penman—Monteith 公式操作简便且计算结果准确^[13-14],适应于不同气候类型地区 ET_0 计算。

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

$$R_n = (1 - \alpha) \left(0.2 + 0.79 \frac{n}{N} \right) R_{sa} - \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] (0.56 - 0.25 \sqrt{e_a}) \left(0.9 \frac{n}{N} + 0.1 \right) \quad (2)$$

式中: ET_0 代表站点潜在蒸散量 (mm); Δ 为斜率值 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); R_n 为作物表面的净辐射量 (MJ/m^2); γ 是湿

度计常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); T 为日平均气温($^\circ\text{C}$); u_2 为2 m 高处风速(m/s); G 为土壤热通量($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$),由最高气温和最低气温平均值计算得到; e_s 为空气饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压($\text{kPa}/^\circ\text{C}$);各因子具体计算公式参照文献^[7]。

1.2.2 敏感系数 敏感系数由 McCuen^[15] 首先提出,该方法操作简单,在 ET_0 研究中得到广泛应用。本文利用敏感系数计算河北省春季 ET_0 对各气象因子变化的敏感程度,分析 ET_0 随各气象因子变化特征及变化方向,进而比较得出影响 ET_0 变化的主导因子。具体计算公式如下:

$$S_{vi} = \lim_{\Delta v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \text{ET}_0 / \text{ET}_0}{\Delta v_i / v_i} \right) = \frac{\partial \text{ET}_0}{\partial v_i} \cdot \frac{v_i}{\text{ET}_0} \quad (3)$$

式中: S_{vi} 为潜在蒸散量 ET_0 对某气象因子 x 的敏感系数,敏感系数的正负反映 ET_0 与气象因子的相关性,敏感系数为正表明 ET_0 变化趋势与该气象因子变化趋势方向相同。绝对值大小反映了气象因子对 ET_0 影响大小^[16]。当 ET_0 对某气象因子的敏感系数为 0.1 时,表明当该气象因子变量变化 10% 时, ET_0 将变化 1%。

1.2.3 气象因子对 ET_0 的贡献值 尹云鹤等^[17] 认为气候因子的相对变化 (Rc_{vi}) 与其敏感系数 (S_{vi}) 的乘积可以表示该气象因子变化对 ET_0 变化的贡献量,贡献量最大的气象要素可以被看作该站点 ET_0 变化的主导因子。因此本研究利用贡献值计算气象因子对

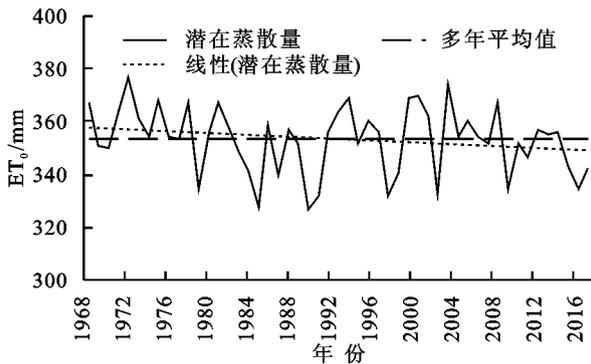


图2 1968—2018年春季 ET_0 年际变化趋势

2.1.2 周期变化 将各年份春季 ET_0 进行 Morlet 小波分析,小尺度变化镶嵌在较大尺度下的复杂环境当中。1968—2018 年河北省春季 ET_0 在 25~30 a 尺度上振荡周期最明显, ET_0 在周期震荡中存在“多—少—多”的变化。”1990 年后,在小尺度 (16~20 a) 上也出现了周期性震荡, ET_0 在震荡中存在“少—多—少”的循环变化。此外,在 13~15 a 尺度上也存在若干小周期循环。为了进一步明确春季 ET_0 随时间变化的主周期,绘制小波方差分析图,分析得出:春季 ET_0 在 2 个尺度下的小波方差极值表现最为显著,首先是在 35 a 左右小波方差极值最大,为峰值,说明春

ET_0 变化贡献率,在此基础上研究 ET_0 变化成因,其计算公式如下:

$$C_{vi} = S_{vi} \cdot Rc_{vi} \quad (4)$$

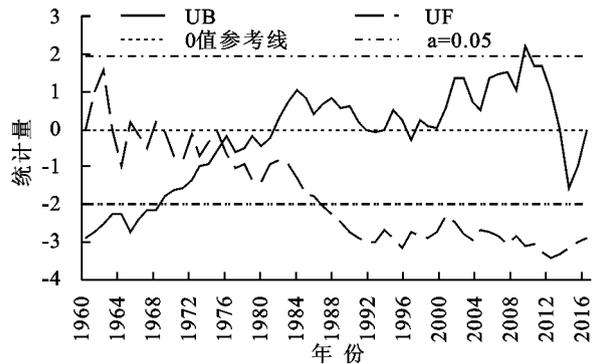
$$Rc_{vi} = \frac{n \cdot \text{Trend}_{vi}}{v_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中: C_{vi} 和 S_{vi} 为贡献率和敏感系数; Trend_{vi} 为该气象因子多年线性倾向率,由 v_i 与年份的一元线性回归趋势分析得到; n 为统计年份,本文中 n 取值为 51。

2 结果与分析

2.1 春季 ET_0 趋势特征

2.1.1 年际变化趋势 河北省春季 ET_0 年际变化如图 2 所示。由图可知,1968—2018 年河北省春季年平均 ET_0 呈下降趋势,变化率为 $-1.679 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。多年平均值 353.20 mm,最小值出现在 1990 年,为 326.72 mm,最大值出现在 1972 年,为 376.97 mm;整体上来看,河北省春季 ET_0 年际变化较大,相对变化率为 14.22%,减少趋势分别通过了 0.01, 0.05 的信度检验。变化趋势与谢贤群等^[15] 的研究成果大致相同。从图 M-K 突变检测曲线可知,春季 ET_0 下降趋势显著。UF 和 UB 两条曲线在 1977 年出现突变点,突变前 ET_0 平均下降幅度为 $-1.798 \text{ mm}/10 \text{ a}$,突变后平均下降幅度为 $-1.071 \text{ mm}/10 \text{ a}$,1977 年后 ET_0 下降趋势变缓。



季 ET_0 在 35 a 及 20 a 左右呈现明显周期变化,35 a 左右周期变化最为明显。即河北省春季 ET_0 在 35 a 左右会经历由多变少的变化过程。

2.1.3 空间变化特征 对春季及春季各月 ET_0 多年平均数据进行空间分析(图 3),从总体上看,河北省 1968—2018 年春季 ET_0 空间分布并不均匀,高值区主要分布在南部及偏东部地区,北部及偏西部地区数值相对较小。

从局部范围上看,由于所处的地理环境不同导致 ET_0 空间分布情况出现较大差异。高值区主要分布在张北、承德、黄骅等地, ET_0 分别达到了 436.88 mm, 413.59 mm, 366.16 mm,这主要是由于张北和

承德地处燕山余脉,盛行下沉气流,降水较少,故 ET_0 较大,同时黄骅位于渤海之滨,受海洋影响风速较大,且纬度位置偏低,温度较高,故 ET_0 较大。低值区主要分布在石家庄、邢台等地, ET_0 分别为 306.28 mm, 320.54 mm,这主要由于两地地处太行山脉与华北平原交汇地带,地势起伏较大,在季风作用下易形成地形雨,降水量较大,另一方面可能与当地重工业发达,

空气中悬浮颗粒物较多,云量较大有关。

春季各月 ET_0 空间分布状况与春季总体 ET_0 分布情况基本一致,整体呈现由东南向西北递减趋势。春季各月 ET_0 平均均值并不相同,经计算可知,5 月各气象站点平 ET_0 平均均值最高,为 148.73 mm,其次是 4 月的 120.36 mm 和 3 月的 84.11 mm,分别占春季的 42.10%,34.07% 和 23.81%。

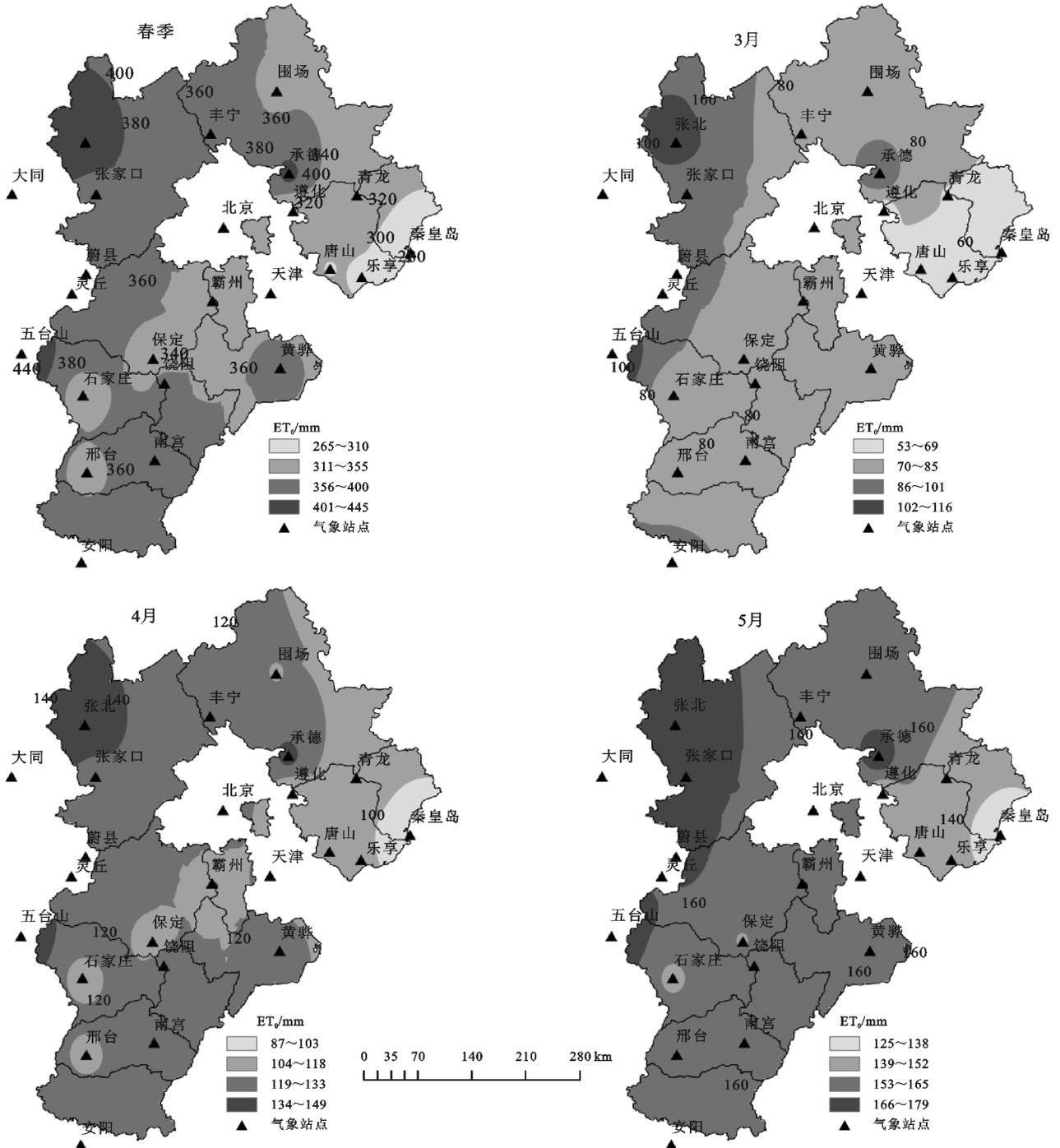


图 3 春季及春季各月河北省 ET_0 空间分布

2.2 春季 ET_0 敏感性分析

2.2.1 ET_0 对气象因子敏感性特征 利用敏感系数公式,分别计算出春季及各月 ET_0 对不同气象因子的敏感

系数(表 1),由表 1 可看出,春季及春季各月各站点平均 ET_0 与平均风速、日照时数、平均气温、最高气温和最低气温的敏感系数为正值,与相对湿度的敏感系数为负

值。敏感系数绝对值大小则反映气象因子对 ET_0 影响大小,通过比较敏感系数绝对值可知, ET_0 的变化对各个气象因子敏感程度依次为相对湿度 > 最高气温 > 日照时数 > 平均风速 > 平均气温 > 最低气温。王鹏涛等^[18]认为,华北平原 ET_0 变化对相对湿度最为敏感,本文研究结果与之一致。此外关于 ET_0 敏感系数的研究结果与刘昌明等^[19]对黄河、海河和淮河流域片区整体的敏感系数大小较为一致。

表 1 春季及各月 ET_0 对不同气象因子的敏感系数

时间	平均 风速	日照 时数	相对 湿度	平均 气温	最高 气温	最低 气温
春季	0.13	0.15	-0.35	0.17	0.25	0.04
3月	0.12	0.14	-0.38	0.01	0.19	-0.01
4月	0.12	0.15	-0.34	0.02	0.27	0.05
5月	0.11	0.27	-0.31	0.03	0.28	0.07

2.2.2 气象因子敏感系数的空间分布 基于各气象站点对各气象因子敏感系数数据,利用 GIS 平台,分别对各气象因子敏感性系数进行空间差值,得出春季各气象因子敏感系数的空间分布状况(图 4)。

从总体上看, ET_0 变化对平均气温、最高气温、最低气温、日照时数和平均风速表现为正敏感,对相对湿度表现为负敏感。平均温度的敏感系数在空间分布上表现为相对较均匀的特点,没有出现较大波动。西北张家口、张北等地敏感系数稍低,其敏感系数分别为 -0.02 及 0.01;而南部邢台、石家庄等地稍大,其敏感系数达到 0.85 及 0.73;最高温度的敏感系数呈现出由南向北地区逐渐降低的趋势,其中,南部的石家庄、邢台以及北部的承德等地敏感系数相对较大,其敏感系数分别为 0.38, 0.37, 0.36。北部的张北、丰宁等地则为低值区,敏感系数分别为 0.01 及 0.02;最低温度的敏感系数变化态势大致与最高气温敏感系数保持一致。由于北部地区海拔较高,气温偏低,最高气温与最低气温表现不甚明显,故其敏感系数相对较小;日照时数较敏感的地区主要分布在全区的西部偏北地区,如北部围场、承德等地风速敏感系数达到 0.23 及 0.21;平均风速敏感系数较高地区则主要分布在南部地区,邢台、南宫等地敏感系数相对较高,敏感系数分别为 0.23 及 0.22,说明当风速发生变化时,河北省南部 ET_0 能敏感的反映风速的变化。研究结果与该地理范围内各气象因子敏感系数变化情况以及空间分布规律相一致^[20-21]。这与该地区气象因子的变化有关^[22-23]。本文关于 ET_0 敏感系数研究结果与王鹏涛等^[18]对华北平原和刘昌明^[19]对黄河、海河和淮河流域片区的敏感系数大小一致。

2.3 ET_0 变化成因分析

2.3.1 各气象因子对潜在蒸散量变化的贡献率 利用 1968—2018 年逐日气象数据进行统计分析,分别计算出各气象因子 51 a 线性倾向率、平均值及变化率,结

合上文敏感系数数据,计算各气象因子对 ET_0 变化的贡献率,见表 2。统计数据显示,51 a 范围内,平均风速、日照时数、相对湿度均呈下降趋势,其中相对湿度的下降速率最高,为 -0.92/10 a。而平均气温、最高气温等 3 个气温因子则表现出逐年升高趋势,变化率分别为 0.48°C/10 a, 0.43°C/10 a 和 0.49°C/10 a, 6 种气象因子变化情况均通过 0.01 显著性水平检验。

总体上看,不同气象因子对 ET_0 贡献率并不相同,贡献率最大的是平均风速,其次是平均气温、相对湿度,三者的贡献率绝对值总和达到 9.64%,平均风速、平均气温和相对湿度是影响 ET_0 变化的主要因子,最低温度对 ET_0 变化贡献率最小,仅为 1.20%。

平均风速对 ET_0 的负贡献率为 -4.55%,表明平均风速的显著降低会引起 ET_0 的减小。河北省地处华北平原,春季属于冷暖转变的季节,副热带高压逐渐增强,北部西风势力逐渐减弱,风速降低,故平均风速的降低造成 ET_0 的降低。

表 2 气象因子变化对 ET_0 的贡献率

参数	线性 倾向率	平均值	变化率/ %	敏感 系数	贡献率/ %
平均风速	-0.021	3.06 m/s	-35.00	0.13	-4.55
日照时数	-0.011	8.08 h	-7.06	0.15	-1.14
相对湿度	-0.092	49.12%	-9.61	-0.35	3.36
平均气温	0.048	11.18°C	21.98	0.17	3.73
最高温度	0.043	17.75°C	5.18	0.25	1.29
最低温度	0.049	5.01°C	49.97	0.04	1.20

平均气温和相对湿度的增加会引起 ET_0 增高,但实际观测资料统计分析得出中国北方^[24-25]、海河流域^[26]、西北五省^[20]等地区普遍存在“蒸发悖论”现象^[24],即气温增高而 ET_0 减小,本文变化趋势与前人研究结果保持一致。需要指出的是,“蒸发悖论”这一现象成因仍存在较大争议,有很大不确定性,未来仍需加强对该方面深入学习和研究。

2.3.2 气象因子对 ET_0 的贡献量空间分布 部分站点气象因子对 ET_0 贡献量结果如表 3 所示,不同气象站点中气象因子贡献量比值并不相同。北京、邢台、大同、分别位于河北省中部、河北省南部,山西省中部,引起 ET_0 变化的主导因子均为相对湿度,相对湿度贡献率分别为 6.35%, 6.56% 及 4.98%。秦皇岛、黄骅和青龙的主导因子则为平均风速,其贡献率分别为 -8.25%, 2.25%, 2.35%。此外最高气温和最低气温也在局部对 ET_0 的变动起到主要作用,丰宁地区最高气温贡献率为 3.62%、张北地区最低气温贡献率为 -5.59%。北京、丰宁、邢台和大同的 ET_0 较均值有所上升,但是上升原因各异,北京、邢台和大同 ET_0 的增加主要因相对湿度的降低,而丰宁 ET_0 的增加则由于最高气温的增高。张北、石家庄、

秦皇岛、黄骅和青龙等地春季 ET_0 呈降低趋势, 最低气温的降低引起了张北地区 ET_0 的降低, 秦皇岛、黄骅、青龙地区平风速的降低带动了 ET_0 的不断降低。河北省春季 ET_0 变化的主导因子存在空间差异, 其

中, 张家口、承德、围场地区引起 ET_0 降低的主导因子均为平均气温的下降。遵化、青龙、秦皇岛、保定、黄骅、南宫 6 市(县)引起 ET_0 变化的主导因子均为春季平均风速的增大。

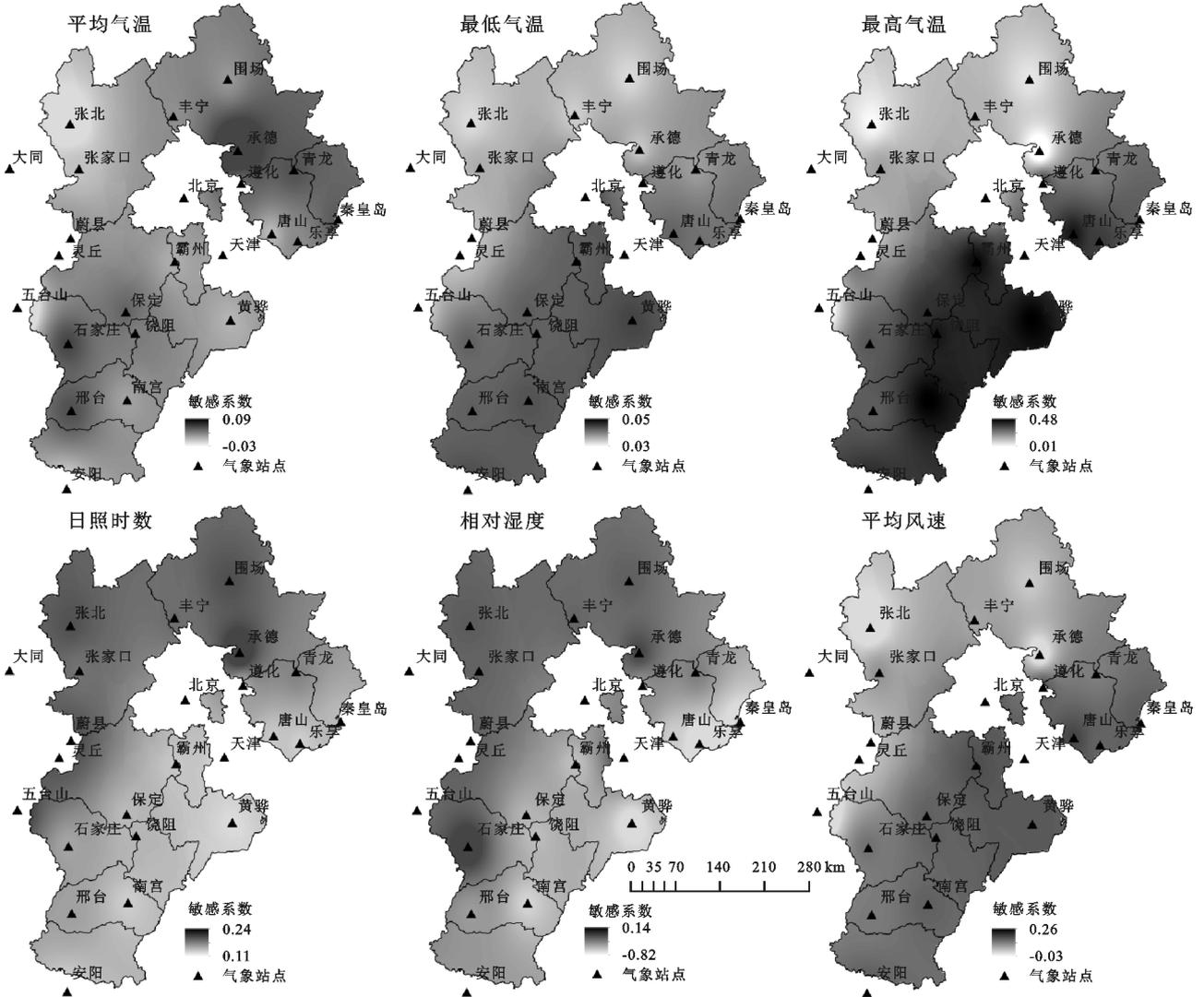


图 4 敏感系数空间变化

综合分析可知气温作为主导因子的区域集中在河北省北部地区, 相对湿度影响区域集中在中西部

地区, 平均风速在河北省南部及偏东部地区贡献率较大。

表 3 部分站点气象因子对 ET_0 的贡献量

站点	ET_0 /mm		气象因子贡献量/%						主导因子
	均值	变率	平均风速	日照时数	相对湿度	均温	最高气温	最低气温	
北京	80.46	3.40	-2.57	-1.46	6.35	2.03	1.5	2.77	相对湿度
丰宁	78.66	0.25	2.98	-2.22	4.58	0.23	3.62	2.26	最高气温
张北	110.00	-3.23	-4.21	-1.23	0.01	0.75	0.25	-5.59	最低气温
邢台	76.86	2.68	2.23	-1.25	6.56	1.26	1.32	2.23	相对湿度
大同	98.06	2.36	1.17	2.36	4.98	0.23	1.65	2.26	相对湿度
石家庄	76.86	-6.35	-6.35	-8.65	4.35	2.65	2.45	2.35	日照时数
秦皇岛	53.19	-3.68	-8.25	-2.36	-1.69	0.12	1.02	1.32	平均风速
黄骅	77.72	-2.15	2.26	1.03	4.35	1.26	1.85	1.65	平均风速
青龙	69.06	-2.83	2.35	1.25	4.89	2.26	1.65	2.26	平均风速

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文在敏感系数研究基础上,分析了春季时段内不同区域引起 ET_0 变化的主导因子。发现主导因素空间变化与敏感系数空间格局并不对应:气温作为主导因子的区域集中在河北省北部地区、相对湿度作为主导因子的区域集中在河北省中部及西部地区、平均风速在河北省南部及偏东部地区对 ET_0 变动贡献率较大。此研究结果有助于揭示不同地区河北省春季 ET_0 变化原因以及不同地区范围内各气象因子影响程度的大小。为河北省充分开发利用水资源及农业的优质发展提供一定参考。但传统 Penman—Monteith 只是点上 ET_0 的估算,对于大区域的结果验证还有待进一步研究。且自然原因和人为原因均直接或间接影响 ET_0 变化,本文仅从自然角度,探讨 ET_0 变化原因,而城市化的快速发展、社会经济发展等人为因素所导致的气象因子变化已经成为影响区域 ET_0 变化重要原因。结合上述要素开展 ET_0 机理研究,还有待进一步完善。此外,在今后的研究工作中,可进一步应用 ET_0 数据,添加作物系数、太阳辐射、作物生长周期等相关数据,时空分析特定作物的光合生产能力、光温生产能力及气候生产能力,从而为本区农业发展及水资源合理配置指明方向。

3.2 结论

(1) 51年间,河北省春季 ET_0 呈下降趋势,变化率为 $-1.679 \text{ mm}/10 \text{ a}$,多年平均值为 353.20 mm 。空间尺度上,呈西北向东南递减趋势。春季各月 ET_0 空间分布与春季总体分布情况基本一致。

(2) ET_0 变化对平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、平均风速表现正敏感,对相对湿度表现为负敏感。敏感程度依次为相对湿度 > 最高气温 > 日照时数 > 平均风速 > 平均气温 > 最低气温;气象因子空间分布上,河北省南部为气温及风速敏感系数高值区,西北及北部为日照时数和相对湿度敏感系数高值区。

(3) 平均气温作为主导因子影响区域集中在河北省北部地区,相对湿度影响在河北省中部及西部地区,平均风速在南部及偏东部地区对 ET_0 变化贡献率较大。

参考文献:

[1] 张娜,金建新,佟长福,等.西藏参考作物蒸散量时空变化特征与影响因素[J].干旱区研究,2017,34(5):1027-1034.

[2] 吴霞,王培娟,霍治国,等.1961—2015年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J].资源科学,2017,39(5):964-977.

[3] 杨加林,刘朝顺,乔枫雪,等.华北平原参考作物蒸散量对气候因子的季节响应分析[J].气候与环境研究,2016,21(4):418-428.

[4] 程玉菲.黑河干流中游平原作物蒸发蒸腾量时空分布研究[D].兰州:兰州大学,2007.

[5] 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.

[6] 李春强,洪克勤,李保国,等.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.

[7] 徐新良,赵美燕,刘洛,等.近30年东北亚南北样带气候变化时空特征分析[J].地理科学,2015,35(11):1468-1474.

[8] 史建国,严昌荣,何文清,等.黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析[J].干旱区研究,2007,24(6):6773-6778.

[9] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near surface wind speeds: Implications for evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2012,416:182-205.

[10] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997,87(1):55-73.

[11] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation Losings its strength[J]. Nature, 1995,377(6551):687-688.

[12] 黄修桥,李英能.华北地区节水型农业分区和发展预测[J].灌溉排水,1995(3):1-8.

[13] 曹永强,高璐,袁立婷,李维佳.辽宁省潜在蒸散量及其敏感性规律分析[J].地理科学,2017,37(9):1422-1429.

[14] 曹金峰,李玉中,刘晓英,等.4种参考作物蒸散量综合法的比较[J].中国农业气象,2015,36(4):428-436.

[15] 刘青.内蒙古农田潜在蒸散量敏感系数时空分布规律研究[J].广西水利水电,2018(4):65-69.

[16] 苗正伟,徐利岗,张薇.京津冀地区参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J].灌溉排水学报,2018,37(5):39-50.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 曹永强,李维佳.辽宁省潜在蒸散时空变化特征与成因[J].生态学报,2018,38(20):7276-7287.

[21] 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.

[22] 杜加强,熊珊珊,刘成程,等.黄河上游地区几种参考作物蒸散量计算方法的适用性比较[J].干旱区地理,2013,36(5):831-840.

- [27] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate[J]. *Hydrological Processes*, 2000,14(16/17):2903-2920.
- [28] José N, Charles F, Jurado E. Spatial variations of interception loss components by Tamaulipan thornscrub in northeastern Mexico[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999,124(2/3):231-239.
- [29] Belmonte Serrato F, Romero Diaz A. A simple technique for measuring rainfall interception by small shrub: 'interception flow collection box'[J]. *Hydrological Processes*, 2015,12(3):471-481.
- [30] Yang Z P, Li X Y, Liu L Y, et al. Characteristics of stemflow for sand-fixed shrubs in Mu Us sandy land, Northwest China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(14):2207-2214.
- [31] Martinez-Meza E. Stemflow throughfall and root water channelization by three arid land shrubs in southern New Mexico[D]. Las Cruces: New Mexico State University, 1994.
- [32] Davie T J A, Durocher M G. A model to consider the spatial variability of rainfall partitioning within deciduous canopy. I. Model description [J]. *Hydrological Processes*, 2015,11(11):1509-1523.
- [33] Owens M K, Lyons R K, Alejandro C L. Rainfall partitioning within semiarid juniper communities: effects of event size and canopy cover [J]. *Hydrological Processes*, 2006,20(15):3179-3189.

~~~~~

(上接第 194 页)

- [27] Solomon S. IPCC(2007): Climate change the physical science basis[C]// Agü Fall Meeting, 2007.
- [28] McIntyre S, Lavorel S, Landsberg J, et al. Disturbance response in vegetation-towards a global perspective on functional traits [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1999,10(5):621-630.
- [29] 汪诗平,王艳芬.不同放牧率下糙隐子草种群补偿性生长的研究[J].*植物学报*,2001,43(4):413-418.
- [30] 汪诗平,李永宏,王艳芬,等.不同放牧率对内蒙古冷蒿草原植物多样性的影响[J].*植物学报*,2001,43(1):89-96.
- [31] 杜际增,王根绪,李元寿.近 45 年长江黄河源区高寒草地退化特征及成因分析[J].*草业学报*,2015,24(6):5-15.
- [32] Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. Production, oxidation and emission of methane in rice paddies[J]. *Fems Microbiology Letters*, 1985,31(6):343-351.
- [33] Holzapfel-Pschorn A, Seiler W. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1986,91(D11):11803-11814.
- [34] Hirota M, Tang Y, Hu Q, et al. Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004,36(5):737-748.
- [35] Cao G, Xu X, Long R, et al. Methane emissions by alpine plant communities in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Biology Letters*, 2008,4(6):681-684.

~~~~~

(上接第 201 页)

- [23] 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.
- [24] 杨泽粟.黄土高原植被生理过程和蒸散量计算方法及变化特征研究[D].兰州:兰州大学,2016.
- [25] 卓玛兰草.甘肃省 1960—2009 年不同气候区潜在蒸散量敏感性分析研究[D].兰州:西北师范大学,2012.
- [26] 刘淼.基于地理信息系统的海河流域蒸散量时空分布特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.