

江苏省参考作物蒸散量的时空变化及影响因素分析

王蒙^{1,2,3}, 刘春伟^{1,2,3*}, 邱让建^{1,2,3}, 张佩⁴, 张方敏^{1,2,3}

(1.南京信息工程大学 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044;

2.南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;

3.南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044; 4.江苏省气象局, 南京 210044)

摘要:【目的】参考作物蒸散量是水分循环和能量循环的重要组成部分, 研究其变化特征及影响因素可以为该地区合理利用水资源, 高效水管理及农业生产布局提供参考。【方法】利用1961—2018年江苏省60个站点的风速、温度、相对湿度和日照时数等逐日数据计算了逐日蒸散量(ET_0), 并采用气候倾向率、敏感性分析、通径分析、贡献率分析等方法对江苏省 ET_0 的时空变化及影响因素进行分析。【结果】①江苏省1961—2018年平均 ET_0 为976.8 mm, 区域整体 ET_0 的变化幅度为-0.44 mm/10 a, 共有28个站点 ET_0 呈增加趋势(47%), 主要分布在无锡以及苏州等苏南区域, 共有11个站点 ET_0 增加趋势显著($p < 0.05$), 其中无锡、太仓、靖江地区 ET_0 气候倾向率较大, 分别为18.6、19.0、30.0 mm/10 a。共有32个站点 ET_0 呈减小趋势(53%), 主要分布在连云港、徐州、宿迁等苏北地区, 共有16个站点 ET_0 减小趋势显著($p < 0.05$), 其中新沂、泗洪、灌南地区 ET_0 减小趋势较大, 分别为-19.2、-23.1、-23.2 mm/10 a; ②丰县(1 007.4 mm)、徐州(1 041.1 mm)以及西连岛(1 130.3 mm)区域为 ET_0 的高值中心; ③ ET_0 对平均温度、日照时间、风速为正敏感, 对相对湿度为负敏感, 且 ET_0 对相对湿度最敏感。平均温度、日照时间、风速、相对湿度与 ET_0 决策系数分别为0.09、0.33、-0.02、0.29。敏感系数空间分布上, S_T 与 S_{WS} 纬向分布特征都较明显; ④贡献率分析表明, 主要影响因素为风速的有22个站点, 均分布在苏北地区, 其中沛县、泗阳、新沂站风速对 ET_0 变化贡献较大, 分别为-13.44%、-12.52%、-12.49%, 主要影响因素为相对湿度的有38个站点, 主要分布在苏南地区, 其中丹阳、靖江、昆山站相对湿度对 ET_0 变化贡献较大, 分别为18.47%、18.57%、20.87%, 全区平均温度和日照时间不对 ET_0 变化产生主要影响。【结论】苏北地区 ET_0 变化的主要影响因素是风速, 且风速贡献率为负, 苏南地区 ET_0 变化的主要影响因素是相对湿度, 相对湿度贡献率为正。

关键词: 参考作物蒸散量; 敏感性分析; 贡献率; 江苏省

中图分类号: S612

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019394

王蒙, 刘春伟, 邱让建, 等. 江苏省参考作物蒸散量的时空变化及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 124-134.

WANG Meng, LIU Chunwei, QIU Rangjian, et al. Temporal and Spatial Variations of Reference Crop Evapotranspiration and Its Influencing Factors in Jiangsu Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 124-134.

0 引言

【研究意义】气候变化加剧了生态系统能量和水分循环相互作用。蒸散又称为作物需水量, 是水分循环的重要组成部分, 也是植物生长发育的基本条件。蒸散量的大小与气象条件、植物本身密切相关。参考作物蒸散量(ET_0)可表征大气蒸散特性, 是影响作物需水量的综合气象因子^[1]。 ET_0 的变化主要由气温、

风速、相对湿度和太阳辐射决定。气温是利于蒸发的能量因素, 气温对蒸散有着很大的影响, 气温越高, 太阳净辐射可转化为蒸散当量数值就越高^[2]; 风速是影响蒸散的重要因素之一, 风速影响水汽和 CO_2 的垂直和水平输送, 风速的湍流交换作用使得近地面空气与上层空气进行交换, 影响植物蒸腾和棵间土壤蒸发^[3-4]; 相对湿度较大时, 饱和水汽压差较小, 植物蒸腾量较少, 反之, 相对湿度较小的时候, 植物蒸腾量大。空气中相对湿度从季节变化上来看, 夏季相对湿度变化较大^[5]; 太阳辐射是地表能量的来源, 是影响蒸散的主要环境因子之一, 也是蒸散过程的主要驱动力^[6]。 ET_0 是水循环的重要组成部分, 因此在气候变化的背景下研究 ET_0 的时空变化及影响其变化的气象

收稿日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309132, 51509130)

作者简介: 王蒙(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事蒸散发理论研究。

E-mail: 862654874@qq.com

通信作者: 刘春伟(1985-), 男, 副教授, 主要从事蒸散发理论和水分循环模拟研究。E-mail: liucw@nuist.edu.cn

因素对合理安排农业生产及优化水资源配置作用重大。【研究进展】敏感性分析可以分析各气象因子对 ET_0 的影响程度^[7-8]。近年来,越来越多的国外研究者通过敏感性分析研究 ET_0 与气象因子之间的关联。Huime 等^[9]认为全球气温升高将导致 ET_0 增加,但是多数研究结果与其相反,自 19 世纪以来的全球许多国家(包括中国、美国、印度、苏联等)的 ET_0 均呈下降趋势^[10-16],但是下降原因各异,Eslamian 等^[17]对伊朗的 5 个不同气候区域气象因子进行敏感性分析,发现温度与相对湿度是 ET_0 变化的主要原因;Vicente 等^[18]通过敏感性分析发现,西班牙地区相对湿度、风速和最高温度对 ET_0 的影响大于日照时间和最低温度,并且 ET_0 变化趋势主要是相对湿度的降低和最高温度的升高。1950 年以来,中国的年平均 ET_0 存在减小的趋势^[19],但在华北干旱地区,年均 ET_0 呈增加的趋势^[20]。国内研究者通过敏感性分析方法探究 ET_0 对气象因子的敏感性,相关研究表明, ET_0 整体呈下降趋势,但是影响 ET_0 变化的原因各异,高红霞等^[21]发现内蒙古兴安盟地区的 ET_0 对气温最敏感;Thomas 等^[10]发现黄土高原地区 ET_0 受相对湿度影响最大。【切入点】江苏省位于我国东部沿海地区,雨热同季,水资源总量丰富。全省年平均温度每 10 a 上升 0.16~0.45 °C,近年来极端天气,如台风、洪涝、高低温对全省影响较大,气候变化和极端天气会影响水资源区域平衡,而江苏不同地区受气候变化影响不同,苏南洪涝多,排水难度大,沿海地区土壤盐渍化,淮北地区经常发生洪涝和干旱,降水减少或过度蒸发会造成水分收支严重不平衡^[22],严重影响农业生产。【拟解决的关键问题】因此本文利用江苏省 60 个站点 1961—2018 年逐日观测数据计算了 ET_0 ,分析江苏省 ET_0 时空变化特征,量化气象因素对其影响,可以为加强水资源管理,提高农业应对气候变化适应能力和抵御气候灾害能力提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江苏地处中国大陆东部沿海地区中部,长江、淮河下游,东濒黄海,北接山东,西连安徽,东南与上海、浙江接壤,是长江三角洲地区的重要组成部分。地跨东经 116°18′—121°57′,北纬 30°45′—35°20′。气候温和,属于温带向亚热带的过渡性气候。江苏地区平均气温介于 13~16 °C,长江以南 15~16 °C,江淮流域 14~15 °C,淮北及沿海 13~14 °C,由东北向西南逐渐增高。研究区及站点分布如图 1 所示。

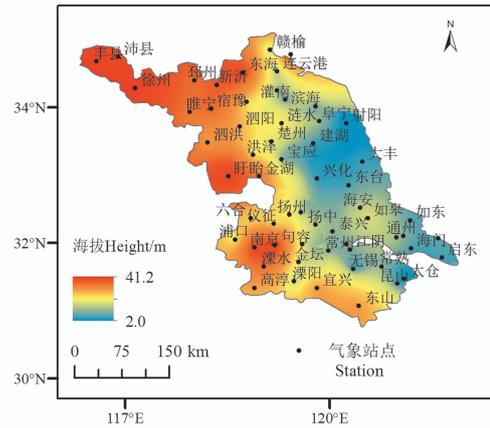


图 1 江苏省气象站点分布及数字高程图

Fig.1 Distribution map of meteorological stations in Jiangsu

1.2 数据来源及处理

本文所用的气象数据源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),选取 1961—2018 年逐日气象数据(包括日最小温度、日最大温度、日平均温度、相对湿度、日照时间、风速。将各气象因子分别表示为 T_{\min} 、 T_{\max} 、 T 、 RH 、 SSD 、 WS 。采用气象学标准,以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—2 月为冬季。

1.3 Penmen-Monteith (P-M) 公式

Penmen-Monteith (P-M) 公式^[23]可以用来计算 ET_0 。P-M 模型是将作物植株下垫面看作统一的整体,主要适用于下垫面均一以及相对密集的作物^[24]。该模型反映了作物水平衡过程的物理特性,具备很好的物理基础,计算简单,具有很强的适用性^[25-26], ET_0 计算式为:

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

式中: ET_0 为参考作物蒸散发量 (mm/d); R_n 为植被表面净辐射量 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$); Δ 为饱和水汽压-温度关系曲线的斜率 ($\text{kPa}/\text{°C}$); γ 为湿度计常数 ($\text{kPa}/\text{°C}$); T 为空气平均温度 (°C); U_2 为在地面以上 2 m 高处的风速 (m/s); e_s 为空气饱和水汽压 (kPa); e_a 为空气实际水汽压 (kPa)。

1.4 气候倾向率

利用最小二乘法,计算各站点 ET_0 的气候倾向率,并利用克里金空间插值法插值,得到 ET_0 气候倾向率的空间分布。样本 Y_i 与时间的线性回归系数 a 的计算式为:

$$Y_i = at + b, \quad (2)$$

式中: t 为时间序列; b 为经验系数; 气候倾向率为 a 乘以 10。

1.5 通径分析

通径分析是回归分析的拓展,将相关系数分解为直接通径系数和间接通径系数,假设有 n 个随机变量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 和 1 个因变量 y , 两因子之间相关系数为 r_{ij} , 因子 x_i 到 y 的直接通径系数是 P_{iy} , 因子 x_i 通过因子 x_j 到 y 的间接通径系数为 r_{ij} 乘以 P_{jy} , 通过相关系数与间接通径系数的计算又可以得到决策系数, 它可以把自变量对因变量的综合作用进行排序, 确定主要的决策变量和限制变量^[27]。本文中利用通径分析来分析各气象因子对 ET_0 的直接及间接影响。

1.6 敏感系数

敏感系数由 McCuen^[28] 首先提出, 计算 ET_0 对各气象因子的偏导数, 即 ET_0 的相对变化量与单个气象因子相对变化量之比计算。具体计算式为:

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

式中: v_i 代表气象因子; S_{v_i} 代表相应气象因子的敏感系数, 将气象因子对 ET_0 的变化无量纲化, 分析结果较清晰, 并得到广泛的应用^[7-21]。敏感系数为正代表气象因子与 ET_0 正相关, 反之则为负相关。绝对值的大小反映了气象因子对 ET_0 的影响程度, 绝对值越大, 气象因子对 ET_0 的影响就越大^[29]。本文将各气象因子敏感系数表示为 S_T 、 S_{SSD} 、 S_{WS} 、 S_{RH} 。

1.7 贡献率

将敏感系数与该因子的多年相对变化率相乘即可得到气象因子对 ET_0 的贡献率^[30]:

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

$$RC_{v_i} = \frac{n \cdot Trend_{v_i}}{|a_{v_i}|} \times 100\%, \quad (5)$$

$$RC_{ET_0} = \frac{n \cdot Trend_{ET_0}}{|a_{v_{ET_0}}|} \times 100\%。 \quad (6)$$

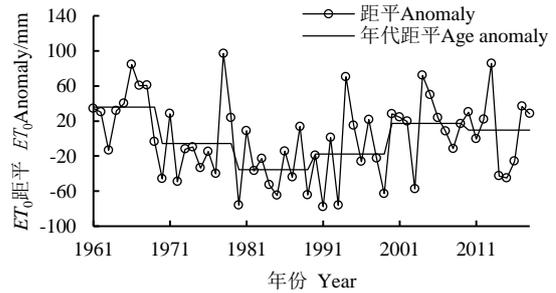
式中: GX_{v_i} 为气象因子对 ET_0 变化的贡献率; RC_{v_i} 是因子的多年相对变化率; RC_{ET_0} 是 ET_0 多年相对变化率也即实际变化率; n 是总年数; $Trend_{v_i}$ 为因子的逐年变化率; a_{v_i} 为因子的多年平均值。将温度、日照时间、风速、相对湿度对 ET_0 变化的贡献率分别标记为 GX_T 、 GX_{SSD} 、 GX_{WS} 、 GX_{RH} 。总贡献率 = $GX_T + GX_{SSD} + GX_{WS} + GX_{RH}$ 。通过分析各因子对 ET_0

的贡献率, 可量化各因子对 ET_0 的影响。

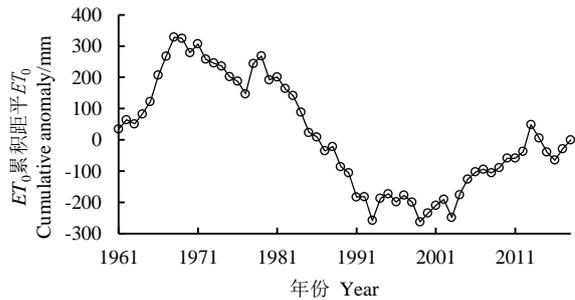
2 结果与分析

2.1 ET_0 的时间变化特征

1961—2018 年江苏省年均 ET_0 总体呈下降趋势, 且递减率为 $-0.44 \text{ mm}/10 \text{ a}$; 如图 2 所示, 年代际变化上, ET_0 从 20 世纪 60 年代到 80 年代一直下降, 90 年代到 21 世纪初呈现上升趋势, 20 世纪 60 年代距平值最大, 说明这 10 a 为 ET_0 最大的 10 a。20 世纪 70 年代、80 年代、90 年代为负距平, 并且 80 年代负距平最大, 说明 80 年代是 ET_0 最小的 10 a。由图 2 可看出, 累积距平值在 1968 年达到最大, 之后逐渐减小, 直到 20 世纪开始逐年上升, 说明 ET_0 在 1968 年前是增加的, 并且高于 1958 年的平均值, ET_0 在 1968 至 20 世纪 90 年代是减小的, 且低于平均值, ET_0 从 21 世纪初开始增加, 高于平均值。由表 1 可知, 春季距平最高值在 2000—2009 年, 最低值在 20 世纪 90 年代; 夏季距平最高值在 60 年代, 最低值在 80 年代; 秋季距平最高值在 60 年代, 最低值在 80 年代; 冬季距平最高值在 60 年代, 最低值在 80 年代。



(a) ET_0 距平 (a) ET_0 Anomaly



(b) ET_0 累积距平 (b) ET_0 Cumulative anomaly

图 2 ET_0 距平和累积距平曲线

Fig.2 Anomaly and acumulative anomaly of annual ET_0

表 1 年度和季节 ET_0 的年代际距平

Table1 Decadal anomalies of annual and seasonal ET_0

年代 Decades	春季 Spring/mm	夏季 Summar/mm	秋季 Autumn/mm	冬季 Winter/mm	年平均 Annual/mm
1961—1969 年	-3.8	28.7	6.5	4.2	36.1
1970—1979 年	-9.7	7.8	-2.8	-0.9	-5.7
1980—1989 年	-7.7	-16.7	-7.6	-2.7	-35.4
1990—1999 年	-11.7	-8.5	4.1	-1.2	-17.7
2000—2009 年	18.2	-5.3	4.4	-0.1	17.4
2010—2018 年	15.9	-3.5	-4.3	1.3	9.9

图 3 所示，全年共有 28 个站点 ET_0 呈增加趋势 (47%)，主要分布在无锡以及苏州等苏南区域，共有 11 个站点 ET_0 增加趋势显著 ($p < 0.05$)，其中无锡、太仓、靖江地区 ET_0 气候倾向率较大，分别为 18.6、19.0、30.0 mm/10 a；共有 32 个站点 ET_0 呈减小趋势 (53%)，主要分布在连云港、徐州、宿迁等苏北地区，共有 16 个站点 ET_0 减小趋势显著 ($p < 0.05$)，其中新沂、泗洪、灌南地区 ET_0 减小趋势较大，分别为 -19.2、-23.1、-23.2 mm/10 a。季节尺度上，春季共有 48 个站点 ET_0 呈现增加趋势 (80%)，主要分布在淮河以南，显著增加的站点有 34 个，其中无锡、太仓、靖江气候倾向率较高，分别为 12.7、12.8、14.3 mm/10 a，共有 12 个站点 ET_0 呈减小趋势，且减小趋势均不显著；夏季仅有 2 个站点 ET_0 呈现增加趋势，分别为太仓、靖江，共有 58 个站点 ET_0 呈减小趋势，显著减小的站点有 23 个，其中灌南、泗洪、睢宁气候倾向

率较高，分别为 -12.5、-11.9、-11.3 mm/10 a；秋季共有 27 个站点 ET_0 呈现增加趋势 (45%)，主要分布在淮河以南，显著增加的站点有 13 个，其中金坛、丹阳、靖江气候倾向率较高，分别为 4.4、4.7、6.5 mm/10 a，共有 33 个站点 ET_0 呈现减小趋势 (55%)，主要分布在淮河以北，显著减小的站点有 17 个，其中泗洪、灌南、东海气候倾向率较高，分别为 -5.7、-5.3、-4.9 mm/10 a；冬季共有 21 个站点 ET_0 呈现增加趋势 (35%)，主要分布在东南沿海以及镇江等地，显著增加的站点有 6 个，其中南京、丹阳、靖江气候倾向率较高，分别为 1.8、1.9、2.7 mm/10 a，有 39 个站点 ET_0 呈现减小趋势 (65%) 主要分布在淮河以北以及苏州部分地区，显著减小的站点有 6 个，其中泗洪、灌云、东海气候倾向率较高，分别为 -2.9、-2.7、-2.7 mm/10 a。

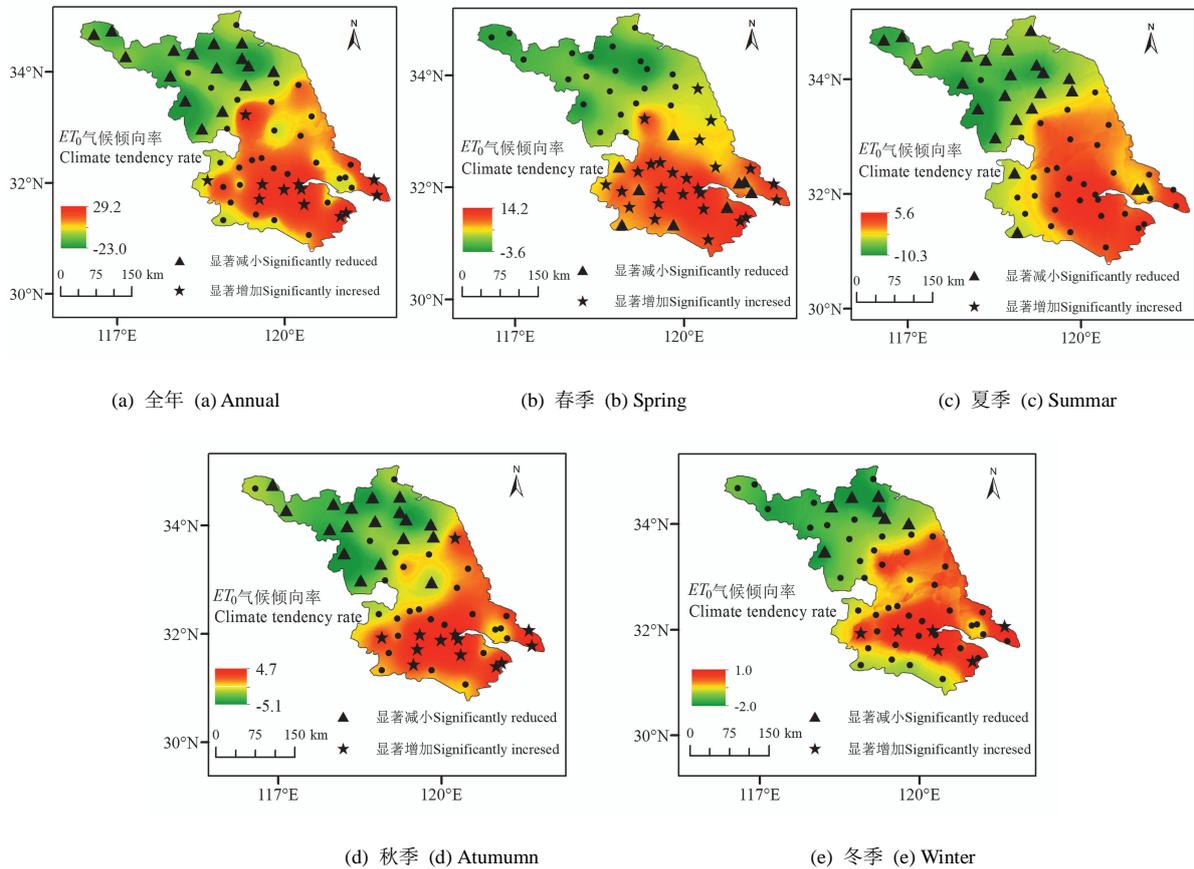


图 3 年度和季节 ET_0 气候倾向率的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of annual and seasonal ET_0 climate tendency rate

2.2 ET_0 的空间分布特征

江苏地区多年平均 ET_0 为 976.8 mm。由图 4 可知，淮北地区的年平均 ET_0 较高，几个明显的高值区域分别在丰县 (1 007.4 mm)、徐州 (1 041.1 mm) 以及西连岛 (1 130.3 mm) 区域，江淮地区年平均 ET_0 较淮北地区小，平均为 964.2 mm；苏中地区整体呈由西往东逐步递减，苏中东部沿海地区年平均 ET_0 最小，

平均为 944.2 mm；苏南有 2 个高值区，分别是高淳 (1 010.3 mm) 以及东山 (1 023.6 mm)；总体呈现由南往苏中地区递减，再由苏中地区往苏北地区递增的趋势。

由图 5 所知，春季淮北地区年 ET_0 较大，站点平均为 301.6 mm，低值中心主要在南通市、苏州的东部、溧阳以及宜兴，站点平均为 242.6 mm，东部沿

海呈现由北往南逐步递减的趋势；夏季 ET_0 高值区与全年 ET_0 相近，分布在徐州西北部、苏州东山以及高淳，平均为 395.2 mm，低值中心主要分布在盐城东部等沿海城市，平均为 372.0 mm；秋季 ET_0 高值区分布在连云港及赣榆地区，平均为 236.5 mm，低值中心主要在苏州东山、南通东南、徐州、宿迁地区，平均为 200.6 mm；冬季年 ET_0 空间分布与秋季相近，高值区在连云港的东北，苏州东山以及南通东南，平均为 111.4 mm，江淮地区年 ET_0 较低，平均为 98.2 mm。全区 ET_0 年内变化较明显，春季 ET_0 平均为 273.1 mm，夏季为 381.4 mm，秋季为 206.8 mm，冬季为 101.6 mm，春夏秋冬四季分别占比 28%、40%、21%、11%，其中夏季贡献最大。

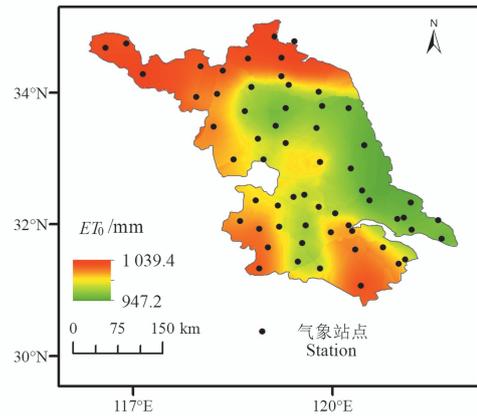
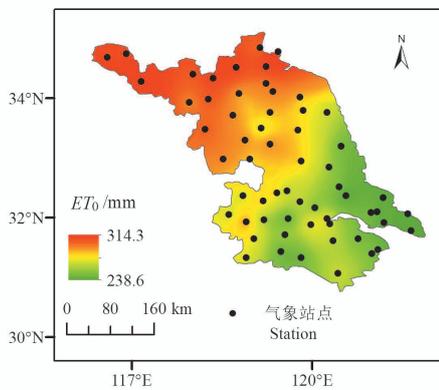
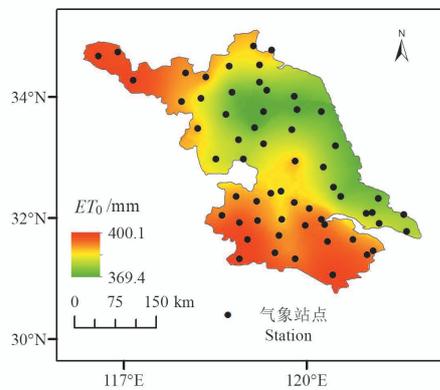


图 4 年 ET_0 的空间分布

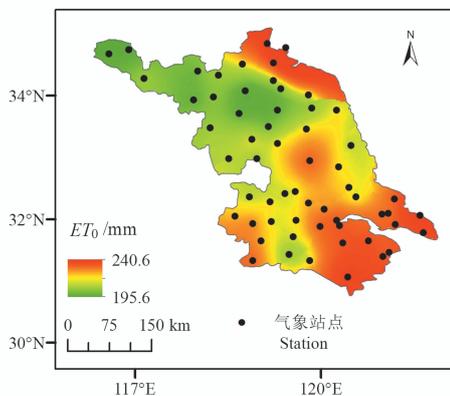
Fig.4 Spatial distribution of annual ET_0



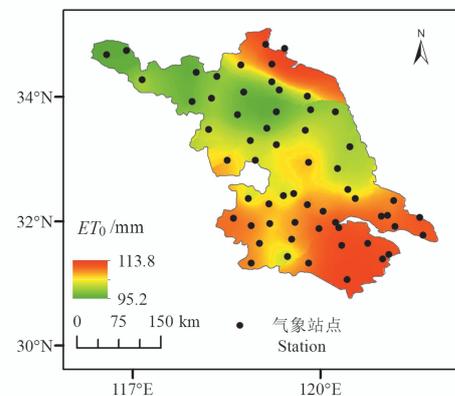
(a) 春季 Spring



(b) 夏季 Summer



(c) 秋季 Autumn



(d) 冬季 Winter

图 5 四季 ET_0 的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of seasonal ET_0

2.3 敏感性分析

2.3.1 敏感系数时间变化

图 6 (a) —图 6 (d) 分别为温度、日照时间、风速、相对湿度敏感系数的年变化图。 S_T 、 S_{SSD} 、 S_{WS} 均为正值，表明 ET_0 随平均温度、风速以及日照时间的增加而增加， S_{RH} 为负值，表明 ET_0 随相对湿度的增加而减小。通过比较敏感系数绝对值大小，从图 6

可以看出， ET_0 对相对湿度最敏感。从年变化上看， S_{RH} 和 S_{WS} 的敏感性呈上升趋势， S_T 、 S_{SSD} 的敏感性呈下降趋势， S_T 、 S_{SSD} 、 S_{WS} 、 S_{RH} 敏感系数气候倾向率分别为 $-0.001/10 a$ 、 $-0.003/10 a$ 、 $0.008/10 a$ 、 $0.098/10 a$ ，除 S_T 以外， S_{SSD} 、 S_{WS} 及 S_{RH} 的趋势变化均是显著的 ($p < 0.05$)。其中相对湿度的敏感性绝对值较大，并且 ET_0 对相对湿度的负敏感性在年变化上逐渐减弱。

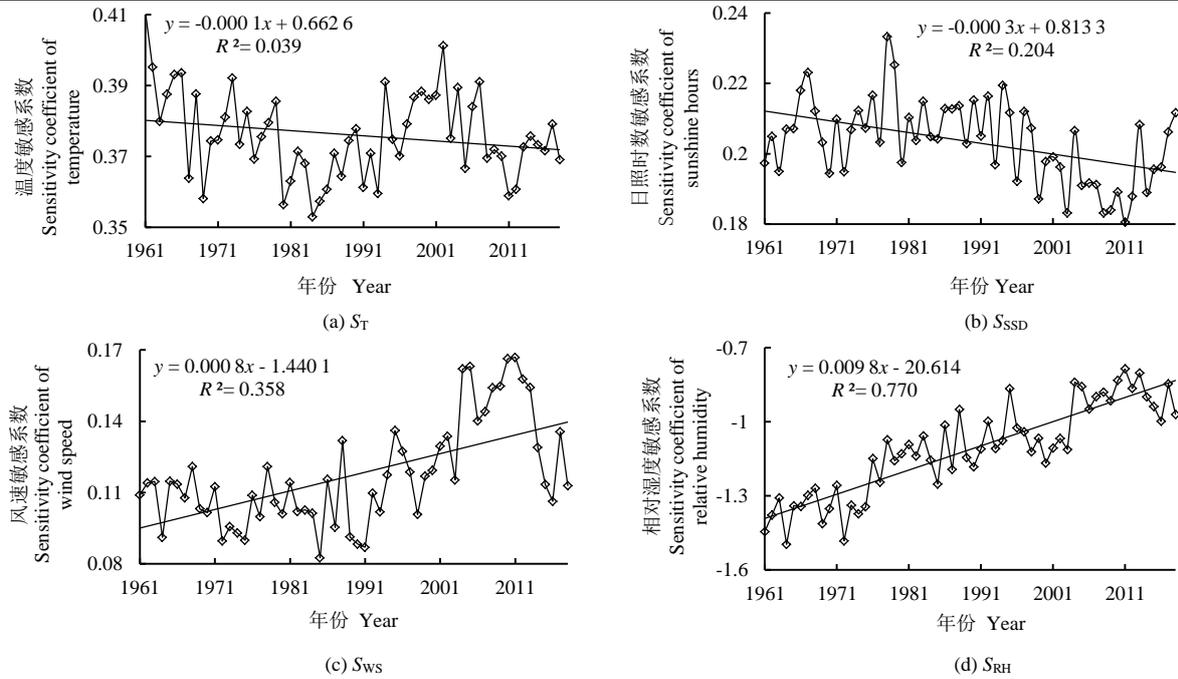


图 6 气象要素敏感系数年变化

Fig.6 Sensitivity coefficient of meteorological elements from 1961 to 2018

采用通径分析法进一步分析各气象因子对 ET_0 的影响 (表 2)。温度对年 ET_0 的直接通径系数为 0.66, 相关系数仅有 0.40, 其原因是 SSD 及 WS 通过影响 T 对 ET_0 起限制作用, 且间接通径系数分别为 -0.25、-0.23; SSD 相关系数 (0.58) 较大, 且直接通径系数 (0.64) 较大, 而间接通径系数 (-0.06) 较小, 说明 SSD 对 ET_0 的影响主要通过直接作用为主; WS 的相关系数较小 (0.17), 且直接通径系数较小 (0.37), 但是间接通径系数总和较大, 为 -0.20, 主要是由于 T 及 SSD 通过影响 RH 对 ET_0 起限制作用, 且间接通径系数分别为 -0.40、-0.23; RH 与 ET_0 的相关系数为 -0.52, 其绝对值较大, 主要是由于直接通径系数 (-0.426) 起主要作用。决策系数排序为 $SSD > RH > T > WS$, 说明 SSD 对 ET_0 变化的综合决定能力更大。结合敏感性分析, 全区 SSD 的综合决定能力较大, 但是敏感系数较低, 说明当 SSD 变化时, 年均 ET_0 的反应偏弱, 并不能敏感感知 SSD 对 ET_0 的影响, 这可能与站点地理位

置有关; RH 综合决策系数较大, 敏感系数也较大, 说明 RH 对 ET_0 的变化影响较大, 且年均 ET_0 能够敏感感知 RH 对 ET_0 的影响。 RH 综合决策系数较大, 敏感系数也较大, 说明 RH 对 ET_0 的变化影响较大, 且年均 ET_0 能够敏感感知 RH 对 ET_0 的影响。

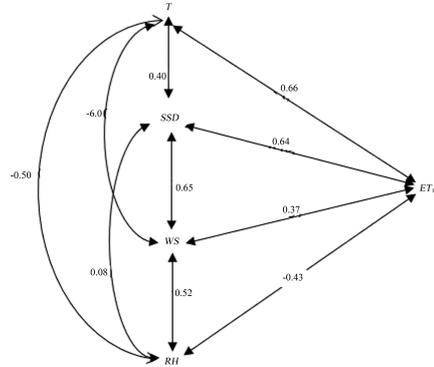


图 7 年尺度 ET_0 变化影响因子通径分析图

Fig.7 Path coefficients of factors on yearly ET_0

表 2 年尺度 ET_0 变化影响因子的通径分析

Table 2 Path coefficients of factors on yearly ET_0

因子 Factor	相关系数 Coefficients related with ET_0	直接通径系数 Direct path coefficients	间接通径系数总和 The sum of indirect path coefficients	间接通径系数 Indirect path coefficients				决策系数 Decision making coefficients
				T	SSD	WS	RH	
T	0.40	0.66	-0.26	-	-0.25	-0.23	0.22	0.09
SSD	0.58	0.64	-0.06	-0.26	-	0.24	-0.03	0.33
WS	0.17	0.37	-0.20	-0.40	0.41	-	-0.22	-0.02
RH	-0.52	-0.43	-0.09	-0.33	0.05	0.19	-	0.29

2.3.2 敏感系数空间变化

图 8 所示, S_T 纬向分布特征较为明显, 总体呈由南往北逐渐递减的趋势, S_T 的高值中心分布在吕泗、东山、西连岛地区, 分别为 0.41、0.42、0.43, 整个淮北地区 S_{Tmin} 都相对较小, 平均为 0.35; S_{SSD} 的高值中心主要在赣榆、睢宁、丰县以及盐城部分地区, 平均值为 0.21, 西连岛、东山 S_{SSD} 较小, 分别为 0.16、

0.19, 区域之间 S_{SSD} 差异较小; S_{WS} 纬向分布特征也较明显, 总体呈现由南往北逐渐递增的趋势, 连云港、徐州、西连岛 S_{WS} 较大, 分别为 0.16、0.17、0.18, 溧阳、吕泗、启东 S_{WS} 较小, 分别为 0.08、0.09、0.09; 东部沿海 S_{RH} 较大, 绝对值平均 1.31, 西北地区 S_{RH} 较小, 绝对值平均为 0.85。

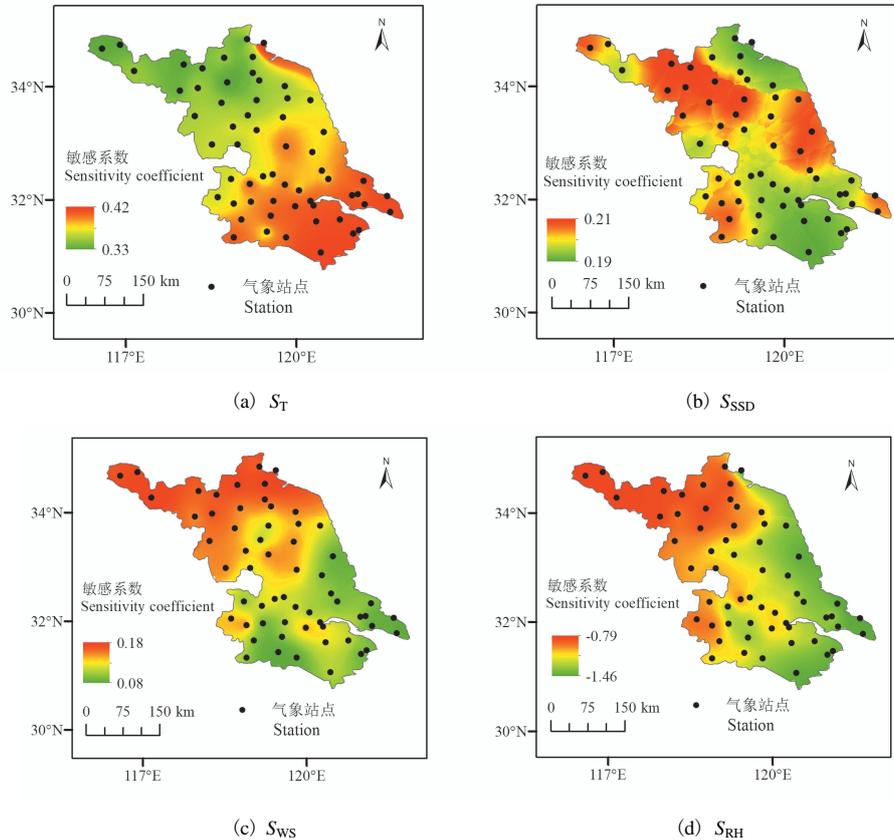


图 8 敏感系数空间变化

Fig.8 Spatial variation of sensitivity coefficient for each factor

2.4 影响因素分析

将敏感系数 (S_{v_i}) 与该因子的多年相对变化率 (RC_{v_i}) 相乘即可得到气象因子对 ET_0 的贡献率 (Con_{v_i}), 可以量化气象因子对 ET_0 的影响以及辨析 ET_0 变化的影响因素。部分站点分析结果如表 3 所示。从图 3 可以看出, 沛县、徐州、灌云等地 ET_0 减少的原因主要归因于风速的减小, 吕泗、金坛、太仓等地 ET_0 增加的原因主要归因于相对湿度的减小。整个江苏地区影响 ET_0 的影响因素存在着空间差异, 如图 9 所示, 主要影响因素为风速的有 22 个站点 (37%), 均分布在苏北地区, 其中沛县、泗阳、新沂站的风速对 ET_0 变化贡献较大, 分别为 -13.44%、-12.52%、-12.49%, 主要影响因素为相对湿度的有 38 个站点 (63%), 主要分布在苏南地区, 其中丹阳、靖江、昆山站的相对湿度对 ET_0 变化贡献较大, 分别为 18.47%、18.57%、20.87%, 全区平均温度和日照时间不对 ET_0 变化产生主要影响。敏感系数与贡献量并

不一致, 这是因为贡献量是敏感系数与因子多年相对变化率的乘积, 相对湿度的敏感系数为负, 然而其多年相对变化率也为负, 所以使得相对湿度对 ET_0 的影响为正贡献。

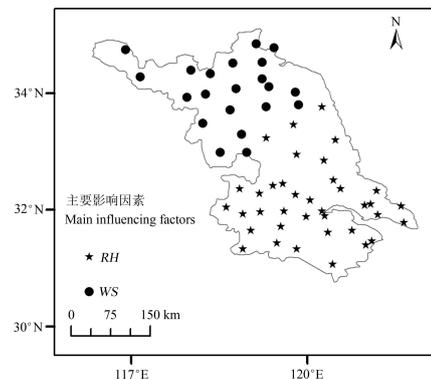


图 9 主要影响因素分布图

Fig.9 Distribution of main influencing factors

表 3 部分站点气象因子的贡献率

Table 3 Contribution rate of some site meteorological factors

站点 Stations	$GX_T/\%$	$GX_{SSD}/\%$	$GX_{WS}/\%$	$GX_{RH}/\%$	总贡献率/% The sum of contribution rate	ET_0 相对变化/% ET_0 Relative change	主要影响因素 Main influencing factors
沛县 Peixian	5.01	-6.46	-13.44	6.71	-8.71	-10.02	WS
徐州 Xuzhou	3.57	-2.31	-10.45	2.60	-6.40	-6.87	WS
灌云 Guanyun	3.82	-5.46	-9.68	0.62	-10.70	-11.19	WS
滨海 Binhai	3.96	-4.76	-10.69	4.16	-7.33	-8.60	WS
阜宁 Funing	3.67	-2.80	-6.98	3.43	-2.69	-3.09	WS
吕泗 Lysi	5.10	-0.63	-3.00	9.49	10.96	9.18	RH
金坛 Jintan	5.10	-2.13	-4.75	12.57	10.79	8.79	RH
太仓 Taicang	5.51	-1.34	-4.40	12.78	12.56	11.25	RH
靖江 Jinjiang	6.67	-0.08	-6.02	18.57	19.15	17.27	RH
浦口 Pukou	3.47	-3.30	-2.43	9.32	7.07	6.92	RH

3 讨论

江苏属于全国粮食生产区，目前气候变化及极端天气日趋严重，已经对江苏地区的农业生产和水资源区域平衡产生了很大的影响，因此本文分析江苏省 ET_0 时空变化及其影响因素可以提高本地区农业生产用水的估算水平，增强农业生产应对气候变化适应能力和抵御气候灾害能力。

敏感系数表示气象因子与 ET_0 之间的相关性，敏感系数为正，表示气象因子与 ET_0 为正相关，敏感系数为负，表示气象因子与 ET_0 为负相关，敏感系数绝对值大小代表气象因子与 ET_0 之间的相关程度，本研究发现江苏地区相对湿度敏感系数为负，平均温度、日照时间、风速敏感系数为正，与新乡、海河流域、河北等地区相一致^[31-34]。但是，不同地区 ET_0 对各气象因子的敏感程度并不完全一致，本文得到江苏地区 ET_0 对相对湿度最敏感，Zhao 等^[35]研究发现黑龙江省 ET_0 对相对湿度最敏感；王媛等^[36]研究发现艾比湖绿洲 ET_0 对相对湿度最敏感；罗那那等^[37]研究发现石河子地区 ET_0 对温度最敏感。敏感系数正负与贡献率正负并不一致，这是因为 ET_0 不仅受气候敏感性影响，还受气候因子本身及变化程度的影响，本文年平均相对湿度敏感系数为-1.11，但是相对湿度年变化幅度为-0.009/10 a，故贡献率为正。敏感性分析结合通径分析结果显示，全区 SSD 的综合决定能力较大，但是敏感系数较低，说明当 SSD 变化时，年均 ET_0 的反应偏弱，并不能敏感感知 SSD 对 ET_0 的影响，这可能与站点地理位置有关。

不同地区 ET_0 变化的主要影响因素不完全一致。本研究得到江苏地区 ET_0 变化的主要影响因素是风速和相对湿度，董旭光等^[38]也发现山东省的 ET_0 变化主要影响因素是风速和相对湿度，这可能由于山东和江苏地形和地理位置较相似，因此气象要素对 ET_0 变化

影响较接近；而吴文玉等^[39]发现安徽省 ET_0 变化的主导因素为日照时间和风速，这可能是由于安徽省海拔较高，故太阳辐射对 ET_0 变化起着很大的作用，江苏属于沿海地区，风速和湿度更容易影响 ET_0 ；Gao 等^[40]发现风速是西辽河流域 ET_0 变化的主导因素。一般情况下，年际尺度气温与蒸散之间为正相关关系^[41]，江苏地区日平均气温年变化为 0.30℃/10 a，而 ET_0 年变化为-0.44 mm/10 a，江苏地区气温呈升高趋势，而 ET_0 是下降的，这是因为江苏地区靠海，气温对 ET_0 变化的贡献并不大， ET_0 变化的主要影响因素是风速以及相对湿度。

ET_0 不仅受气象因子变化的影响，还受地形，人类活动，下垫面等因素的影响，本文涉及的站点海拔均较低，地形对各站点影响较小，且人类活动及下垫面等因素对本地区 ET_0 变化的研究还有待完善。此外，本研究仅从 ET_0 理论公式探究了 ET_0 变化的成因，并没有结合实际蒸散量与 ET_0 的对比进行分析，因此本文研究成果存在一定局限性。

4 结论

1) 江苏地区多年平均 ET_0 为 976.8 mm，丰县、徐州以及西连岛区域为 ET_0 的高值中心。全区 ET_0 年内变化较明显，春季 ET_0 平均为 273.1 mm，夏季为 381.4 mm，秋季为 206.8 mm，冬季为 101.6 mm，春夏秋冬四季分别占比 28%、40%、21%、11%，夏季贡献最大。

2) 近 58 年 ET_0 呈下降趋势，且递减率为-0.44 mm/10 a。共有 28 个站点 ET_0 呈增加趋势，共有 11 个站点 ET_0 增加趋势显著 ($p < 0.05$)，其中无锡、太仓、靖江地区 ET_0 气候倾向率较大，分别为 18.6、19.0、30.0 mm/10 a；共有 32 个站点 ET_0 呈减小趋势，共有 16 个站点 ET_0 减小趋势显著 ($p < 0.05$)，其中新沂、泗洪、灌南地区 ET_0 减小趋势较大，分别为-19.2、-23.1、

-23.2 mm/10 a。

3) ET_0 对平均温度、日照时间、风速为正敏感,对相对湿度为负敏感,且 ET_0 对相对湿度最敏感;平均温度、日照时间、风速、相对湿度与 ET_0 相关系数分别为 0.396、0.580、0.165、-0.516。敏感系数空间分布上, S_T 与 S_{WS} 纬向分布特征都较明显。

4) 贡献率分析表明,主要影响因素为风速的有 22 个站点,均分布在苏北地区,其中沛县、泗阳、新沂站的风速对 ET_0 变化贡献较大,分别为-13.44%、-12.52%、-12.49%,主要影响因素为相对湿度的有 38 个站点,主要分布在苏南地区,其中丹阳、靖江、昆山站的相对湿度对 ET_0 变化贡献较大,分别为 18.47%、18.57%、20.87%,全区平均温度和日照时间不对 ET_0 变化产生主要影响。江苏地区 ET_0 变化的主要影响因素是风速和相对湿度。

参考文献:

- [1] 康丽娟, 巴特尔·巴克, 罗那那, 等. 阿勒泰地区不同时间尺度参考作物蒸散量的时空变化及影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(8): 502-511.
KANG Lijuan, BATEER B K, LUO Nana, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of reference crop evapotranspiration at different time scales in Altay region[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(8): 502-511.
- [2] 孙砾石, 柏林, 刘艳, 等. 气候变化对扎龙湿地景观破碎化过程的影响[J]. 湿地科学与管理, 2018, 14(3): 40-44.
SUN Leshi, BO Lin, LIU Yan, et al. Impact of climate change on landscape fragmentation process in Zhalong wetland[J]. Wetland Science & Management, 2018, 14(3): 40-44.
- [3] 刘思敏, 余新晓, 牛赟. 祁连山排露沟流域降雪消融与融水径流分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(12): 96-100, 112.
LIU Simin, YU Xinxiao, NIU Yun. Analysis of snow ablation and meltwater runoff in Pailugou watershed in Qilian Mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(12): 96-100, 112.
- [4] 常宗强, 王有科, 席万鹏. 祁连山水源涵养林土壤水分的蒸发性能[J]. 甘肃科学学报, 2003, 15(3): 68-72.
CHANG Zongqiang, WANG Youke, XI Wanpeng. Evaporation capability of soil moisture in water resources conservation forests of Qilian mountains[J]. Journal of Gansu Sciences, 2003, 15(3): 68-72.
- [5] 赵双喜, 张耀生, 赵新全, 等. 祁连山北坡草地蒸散量及其与影响因素的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 109-115.
ZHAO Shuangxi, ZHANG Yaosheng, ZHAO Xinquan, et al. Research on evapotranspiration and its impact factors on grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2008, 36(1): 109-115.
- [6] 张耀生, 赵新全, 赵双喜, 等. 三江源区温性草原蒸散量与主要影响因素的相关分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 363-368.
ZHANG Yaosheng, ZHAO Xinquan, ZHAO Shuangxi, et al. Correlation between evapotranspiration and climate factors in warm steppe in source region of Yangtze, yellow and Yalu Tsangpo Rivers[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 363-368.
- [7] 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.
XIAO Chunliu, ZHANG Lanxia, CAO Yongqiang, et al. Differentiation and analysis on changing characteristics of potential evapotranspiration in Hebei Province and related dominant factors[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(6): 1-10.
- [8] 马美娟, 景元书, Leila Cudemus, 等. 稻田蒸散估算方法及灌溉影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 82-88.
MA Meijuan, JING Yuanshu, CUDEMUS L, et al. Estimation methods of paddy field evapotranspiration and analysis of irrigation impact[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(2): 82-88.
- [9] HULME M, ZHAO Z C, JIANG T. Recent and future climate change in east Asia[J]. International Journal of Climatology, 1994, 14(6): 637-658.
- [10] THOMAS A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(4): 381-396.
- [11] PETERSON T C, GOLUBEV V S, YA GROISMAN P. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377(6551): 687-688.
- [12] OHMURA A, WILD M. Is the hydrological cycle accelerating[J]. Science, 2002, 298(5597): 1 345-1 346.
- [13] GOLUBEV V S, LAWRIMORE J H, GROISMAN P, et al. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(13): 2 665-2 668.
- [14] GAO G, CHEN D L, REN G Y, et al. Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956—2000[J]. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(1): 3-12.
- [15] 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.
- [16] BRUTSAERT W, PARLANGE M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox[J]. Nature, 1998, 396(6706): 30.
- [17] ESLAMIAN S, KHORDADI M J, ABEDIKOUPI J. Effects of variations in climatic parameters on evapotranspiration in the arid and semi-arid regions[J]. Global and Planetary Change, 2011, 78(3): 188-194.
- [18] VICENTE S M, CESAR A M, ARTURO S L, et al. Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961-2011)[J]. Water Resources Research, 2014, 50(11): 8 458-8 480.
- [19] 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子分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 315-326.
HUANG Huiping, CAO Mingming, SONG Jinxi, et al. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing

- factors in China from 1957 to 2012[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 315-326.
- [20] FENG J, YAN D H, LI C Z, et al. Assessing the impact of climatic factors on potential evapotranspiration in droughts in North China[J]. *Quaternary International*, 2014, 336: 6-12.
- [21] 高红霞, 唐红艳, 李敏. 内蒙古兴安盟参考作物蒸散量时空变化及敏感性分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(4): 419-425.
GAO Hongxia, TANG Hongyan, LI Min. Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration and its sensitivity in xing'an league of Inner Mongolia[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(4): 419-425.
- [22] 王盈盈, 王志良, 张泽中, 等. 基于 SPEI 的贵州省分区干旱时空演变特征[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(6): 119-128.
WANG Yingying, WANG Zhiliang, ZHANG Zezhong, et al. Evaluating the spatiotemporal evolution of drought in Guizhou Province using the SPEI index[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(6): 119-128.
- [23] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[R]*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 15-64.
- [24] 刘春伟, 曾懿婷, 邱让建. 用分段修正双源模型估算南京地区冬小麦生育期蒸散量[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S1): 80-87.
LIU Chunwei, ZENG Xieting, QIU Rangjian. Simulated total evapotranspiration of winter wheat with modified Shuttleworth-Wallace model in different stages in Nanjing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(S1): 80-87.
- [25] 赵旭, 李毅, 刘俊民. 新疆旱区草地参考作物腾发量随机模拟及其应用[J]. *水利学报*, 2008, 39(11): 1 267-1 272, 1 278.
ZHAO Xu, LI Yi, LIU Junmin. Application of stochastic model to simulation of reference crop evapotranspiration in grassland of arid region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(11): 1 267-1 272, 1 278.
- [26] 周瑞, 魏正英, 张育斌, 等. 基于粒子群算法和广义回归神经网络的 ET₀ 预测[J]. *中国农村水利水电*, 2017(6): 1-7.
ZHOU Rui, WEI Zhengying, ZHANG Yubin, et al. A prediction of reference crop evapotranspiration based on generalized regression neural network and particle swarm optimization algorithm[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(6): 1-7.
- [27] 张雪松, 闫艺兰, 胡正华. 不同时间尺度农田蒸散影响因子的途径分析[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(4): 201-210.
ZHANG Xuesong, YAN Yilan, HU Zhenghua. Using path analysis to identify impacting factors of evapotranspiration at different time scales in farmland[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(4): 201-210.
- [28] MCCUEN R H. A sensitivity and error analysis CF procedures used for estimating evaporation[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1974, 10(3): 486-497.
- [29] 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 CSAE*, 2008, 24(5): 1-5.
- [30] 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): 2 226-2 234.
YIN Yunhe, WU Shaohong, DAI Erfu. Attribution of temporal and spatial evolution of potential evapotranspiration in China from 1971 to 2008[J]. *Science Bulletin*, 2010, 55(22): 2 226-2 234.
- [31] 李迎, 吕谋超, 张海文, 等. 参考作物蒸散量对气象要素的敏感性分析[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(7): 94-99.
LI Ying, LYU Mouchao, ZHANG Haiwen, et al. Sensitivity analysis of the reference crop evapotranspiration to meteorological factors[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(7): 94-99.
- [32] 杨艳娟, 曹经福, 熊明明, 等. 影响海河流域参考作物蒸散量的气象因子定量分析[J]. *干旱气象*, 2017, 35(3): 367-373.
YANG Yanjuan, CAO Jingfu, XIONG Mingming, et al. Quantitative analysis of climate factors influencing on potential evapotranspiration changes over Haihe river basin[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, 35(3): 367-373.
- [33] 曹永强, 肖春柳, 李元菲, 等. 河北省春季潜在蒸散量变化特征与成因[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 195-201, 209.
CAO Yongqiang, XIAO Chunliu, LI Yuanfei, et al. Characteristics and causes of potential evapotranspiration in spring in Hebei Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5): 195-201, 209.
- [34] 单楠, 杨晓晖, 时忠杰, 等. 京津风沙源区 1959—2011 年潜在蒸散气候敏感性的时空变异[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1 330-1 337.
SHAN Nan, YANG Xiaohui, SHI Zhongjie, et al. Temporal-spatial change of the sensitivity of potential evapotranspiration to climatic influencing factors in Beijing-Tianjin sand source control project zone[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(5): 1 330-1 337.
- [35] ZHAO J, XU Z X, ZUO D P, et al. Temporal variations of reference evapotranspiration and its sensitivity to meteorological factors in Heihe River Basin, China[J]. *Water Science and Engineering*, 2015, 8(1): 1-8.
- [36] 王媛, 董煜, 焦黎. 艾比湖绿洲参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(7): 110-115.
WANG Yuan, DONG Yu, JIAO Li. Sensitivity analysis of the reference evapotranspiration in ebinur lake oasis[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(7): 110-115.
- [37] 罗那那, 巴特尔·巴克, 吴燕锋. 石河子地区参考作物蒸散量变化特征及气候因子的定量分析[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 251-255, 260.
LUO Nana, BATUR·Bake, WU Yanfeng. Correlation analysis of potential evapotranspiration and key climatic factors in Shihezi City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 251-255, 260.
- [38] 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 Xuguang, GU Weizong, WANG Jing, et al. Quantitative analysis of climate factors for potential evapotranspiration changes in

- Shandong[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 810-823.
- [39] 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, 22(7): 1 160-1 166.
- 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 Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1 160-1 166.
- [40] GAO Z D, HE J S, DONG K B, et al. Sensitivity study of reference crop evapotranspiration during growing season in the West Liao River basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3): 865-881.
- [41] MATHEUS M R, ARIIVALDO J S, JURANDIR Z J, et al. Empirical and learning machine approaches to estimating reference evapotranspiration based on temperature data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 21(6): 165-168.

Temporal and Spatial Variations of Reference Crop Evapotranspiration and Its Influencing Factors in Jiangsu Province

WANG Meng^{1,2,3}, LIU Chunwei^{1,2,3*}, QIU Rangjian^{1,2,3}, ZHANG Pei^{1,2,3}, ZHANG Fangmin^{1,2,3}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing 210044, China; 3. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210044, China)

Abstract: 【Objective】 The evapotranspiration of reference crops is an important part of water cycle and energy cycle. The study of its variation characteristics and influencing factors can provide reference for rational utilization of water resources, efficient water management and agricultural production layout in this area. **【Method】** This study calculated the daily evapotranspiration (ET_0) by using the data of wind speed, temperature, relative humidity and sunshine hours from 1961 to 2018 of 60 locations in Jiangsu province. ,and using methods of climate trend rate, sensitivity analysis, Kriging space interpolation and contribution rate analysis, the present paper analyzed the temporal and spatial variations and the influencing factors of ET_0 in Jiangsu. **【Result】** ①The mean ET_0 was 976.8 mm and the change of the whole area ET_0 was -0.439 mm/10 a from 1961 to 2018 in Jiangsu province. 28 of the locations (47%), mainly located in Wuxi and Suzhou, showed an increasing trend of ET_0 . There were significant increases of ET_0 in 11 sites, among which the climate tendency rates in Wuxi, Taicang and Jingjiang area were 18.58 mm/10 a, 18.97 mm/10 a, 29.65 mm/10 a, respectively. 32 of the locations (53%), mainly distributed in Lianyungang, Xuzhou, Suqian, presented a decreasing trend of ET_0 with a significant decreasing trend ($p < 0.05$) in 16 sites. As characteristic areas, the climate tendency rates The climate tendency rates in Xinyi, Sihong and Guannan decreased by -19.22 mm/10 a, -23.07 mm/10 a, -23.15 mm/10 a, respectively. ②Fengxian county (1 007.4 mm), Xuzhou (1 041.1mm) and Xilian island (1 130.3mm) are the high value centers of ET_0 ; ③ ET_0 is sensitive to average temperature, sunshine hours, wind speed and relative humidity. The decision coefficients of average temperature, sunshine hours, wind speed, relative humidity and ET_0 are 0.09, 0.33, -0.02 and 0.29 respectively. And ET_0 is the most sensitive to relative humidity with a negative correlation coefficient of -0.516 ($p < 0.01$). The zonal distribution characteristics of S_T and S_{WS} are obvious in the spatial distribution of sensitivity coefficient. ④The analysis of contribution rate indicated that wind speed and relative humidity had a great contribution to the change of ET_0 . There were 22 locations, evenly distributed in the north Jiangsu province, mainly influenced by wind speed. Among them, the wind speed of Peixian, Siyang and Xinyi contributed greatly to the change of ET_0 with values of -13.44%, -12.52%, -12.49%, respectively. And 38 sites, mainly located in the south areas, were mainly influenced by the relative humidity. As characteristic areas, Danyang, Jingjiang and Kunshan contributed greatly to the change of ET_0 with values of 18.47%, 18.57%, 20.87%, respectively. In addition, the average temperature and sunshine hours in the whole region have no main effect on the change of ET_0 . **【Conclusion】** The main influencing factor of ET_0 change in Northern Jiangsu is wind speed, and the contribution rate of wind speed is negative. The main influencing factor of ET_0 change in southern Jiangsu is relative humidity, and the contribution rate of relative humidity is positive.

Key words: reference crop evapotranspiration; sensitivity analysis; contribution rate analysis; Jiangsu Province

责任编辑: 韩洋