

陈华凯,石慧兰,张建海,等. 德州湿润指数变化及影响因子分析[J]. 陕西气象,2021(4):39-44.

文章编号:1006-4354(2021)04-0039-06

德州湿润指数变化及影响因子分析

陈华凯,石慧兰,张建海,王萌萌,吕伟绮

(德州市气象局,山东德州 253078)

摘要:利用德州市 1951—2017 年平均气温、平均气压、平均风速、降水量和相对湿度,分析湿润指数、潜在蒸散量和影响因子的敏感系数、贡献率。结果表明:1951—2017 年德州市湿润指数气候年均值为 0.55,气候倾向率为 $-0.018/10\text{ a}$,四季均呈减少趋势;潜在蒸散量气候倾向率 $5.325\text{ mm}/10\text{ a}$,春、夏季减少,秋、冬季增加;降水量气候倾向率 $-11.02\text{ mm}/10\text{ a}$,春、秋季增加,夏、冬季减少;年潜在蒸散量对相对湿度的敏感性最大,其次是平均气温、平均气压、平均风速;平均气温对年潜在蒸散量变化贡献率最大,其次为相对湿度、平均风速、平均气压;平均气温、相对湿度、平均气压的贡献率为正,平均风速的贡献率为负,表明潜在蒸散量随气温升高和相对湿度与气压减小而增加,随风速减小而减少。

关键词:潜在蒸散量;湿润指数;敏感系数;贡献率

中图分类号:P468

文献标识码:A

近几十年受显著的气候变化及人类活动干预和水资源开发利用的影响,地表和地下水资源分布态势发生了明显变化,水资源供需矛盾日益明显,华北平原成为人均水资源量最低地区^[1]。湿润指数指潜在蒸散量与降水量之比,是判别某一区域气候干湿程度的指标^[2-3]。汪彪^[4]等发现西北地区年均潜在蒸散量呈明显减少趋势。杨艳娟^[5]等发现海河流域潜在蒸散量显著减少。有学者^[6-7]研究了影响山东参考作物蒸散量变化的气象因素,发现气象要素相关性存在明显地域差异。林子伦等^[8]分析了山东半岛夏季降水与春季土壤湿度的关系。持续的湿润过程或干燥过程可以改变某地区的干湿状况^[9]。山东干旱造成的灾害在气象灾害中占有比例最高^[10],德州市降水量在山东省属最少,水分条件是制约植物(包括农作物)生长的重要因子。石慧兰等^[11]研究发现德州市日照时数呈减少趋势,其湿润生态环境如何变化,潜在蒸散量变化主要受哪些气象因子影响,目前

未见详细研究。本文研究德州 67 a 湿润指数和潜在蒸散量及降水量变化,分析影响潜在蒸散量变化的敏感气象因子及其贡献率,以期更好地为生态文明建设和农业生产提供气象保障服务。

1 资料与方法

1.1 资料来源

所用资料为德州站 1951—2017 年的各月平均气温、平均气压、平均风速、平均相对湿度和降水量等观测资料,来自山东省气象信息中心资料室,已经过质量控制。30 a 平均值采用世界气象组织 WMO 规定的 1981—2010 年最新标准气候年平均值。四季划分:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至翌年 2 月为冬季。

1.2 气候倾向率

用最小二乘法建立一元线性回归方程,得到气候倾向率,分析气候变化趋势。

1.3 湿润指数

中国气象局的《生态质量气象评价方法》是应

收稿日期:2020-12-14

作者简介:陈华凯,(1985—),男,汉族,海南定安人,学士,工程师,主要从事天气预报和气候研究。

基金项目:山东省气象局重点课题(SDQXZ2016-07)“德州粮食安全智慧气象服务技术研究”;山东省气象局预报员专项“鲁西北雷暴大风的时空分布及物理量特征分析”(SDYBY2018-15)

用比较广泛、持续时间比较长的生态环境质量评价体系^[12]。湿润指数能较客观地反映某一地区的水热平衡状况,表征湿润生态特征,本文采用中国气象局生态质量气象评价规范中湿润指数和潜在蒸散量计算方法^[13],即:

$$K = \frac{R}{E_T}$$

式中, R 为降水量, E_T 为潜在蒸散量。月潜在蒸散量 E_{T_i} (mm) 采用下式计算:

$$E_{T_i} = \frac{22d_i(1.6 + u_i^{1/2})\omega_{oi}(1 - h_i)}{P_i^{1/2}(273.2 + t_i)^{1/4}}$$

式中, i 为月份, P_i 为月平均气压 (hPa), t_i 为月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), d_i 为月总日数, u_i 为在 10~12 m 高度处观测的月平均风速 (m/s), ω_{oi} 为在温度为 t_i 时的饱和水汽压 (hPa), h_i 为月平均相对湿度。

饱和水汽压 ω_o 的计算考虑 2 种情况。当月平均温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C} < t \leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,

$$\omega_o = 1.8213 \times 10^9 \exp\left(-\frac{5328.9}{273.3 + t}\right)$$

当月平均温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,

$$\omega_o = 3.5067 \times 10^{10} \exp\left(-\frac{6139.8}{273.2 + t}\right)$$

饱和水汽压差表示的是实际大气距离水汽达到饱和的程度,它影响着植物气孔的闭合,从而控制着植物蒸腾、光合等生理过程,对生态系统蒸散过程以及水分利用效率有着重要影响。相同温度下空气相对湿度越大,饱和水汽压差越小,蒸散量也越小;反之相同温度下空气相对湿度越小,饱和水汽压差越大,蒸散量也越大。因此分析相对湿度与蒸散量的关系对研究饱和水汽压差和蒸散量的相关性有很好的指示作用。

1.4 气象因子的敏感性和贡献率

潜在蒸散量对气象因子的敏感性参照文献^[8,14]进行计算,即

$$S_{V_i} = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta E_T / E_T}{\Delta V_i / V_i} \right) = \frac{\delta E_T}{\delta V_i} \cdot \frac{V_i}{E_T}$$

式中, S_{V_i} 为敏感系数, E_T 和 ΔE_T 分别为潜在蒸散量及其变化量; V_i 和 ΔV_i 分别为第 i 个气象因子及其变化量。敏感系数为正表示 E_T 随着气候变量的增加而增大,为负表示 E_T 随着气候变量的增加而减小,敏感系数绝对值越大, E_T 对气象

因子的敏感性越大。

将单个气象因子的敏感系数与该要素的多年相对变化率相乘,得到由此要素引起的 E_T 的变化,即为该要素对 E_T 变化的贡献率,贡献率为正表示该要素的变化引起 E_T 增加,为正贡献;贡献率为负表示引起 E_T 减少,为负贡献^[15]。即

$$C_{on,V_i} = S_{V_i} \cdot R_{C,V_i}$$

$$R_{C,V_i} = \frac{n \cdot T_{rend,V_i}}{|\bar{V}_i|} \times 100\%$$

式中, C_{on,V_i} 为气象因子 V_i 对 E_T 变化的贡献率 (%), R_{C,V_i} (%) 是 V_i 的多年相对变化率, n 取值为 67, \bar{V}_i 为 V_i 的多年平均值, T_{rend,V_i} 为 V_i 的气候倾向率,由趋势分析法得到。

各气象因子贡献率相加得到对 E_T 变化的总贡献,公式为: $C_{on} = C_{on,T} + C_{on,U} + C_{on,F} + C_{on,P}$,其中 $C_{on,T}$ 、 $C_{on,U}$ 、 $C_{on,F}$ 、 $C_{on,P}$ 分别为平均气温、相对湿度、平均风速、平均气压对 E_T 变化的贡献率, C_{on} 为 4 个因子共同作用引起的 E_T 变化,也为 E_T 的估计变化。

2 结果分析

2.1 湿润指数和潜在蒸散量及降水量变化特征

2.1.1 年变化 德州 1951—2017 年湿润指数呈下降趋势,气候倾向率为 $-0.018(10\text{ a})^{-1}$ (图 1a)。1964 年湿润指数最大,为 1.61;1965 年湿润指数最小,为 0.23。湿润指数 5 年移动平均波动较大,但总体呈下降趋势。其中,1951—1956 年为上升趋势,1956—1960 年为下降趋势,1960—1964 年为上升趋势,1964—1968 年为下降趋势,1968—1977 年为上升趋势,1977—1989 年为下降趋势,1989—1993 年为上升趋势,1993—2006 年为下降趋势,2006—2013 年为上升趋势,2013—2017 年为下降趋势。由德州市 1951—2017 年潜在蒸散量和降水量变化曲线(图 1b)可知,潜在蒸散量呈上升趋势,气候倾向率为 $5.325\text{ mm}/10\text{ a}$ 。1955 年潜在蒸散量最多,达 1263 mm ,偏多 304 mm ;1968 年次之,为 1259 mm ;1964 年最少,仅 653.2 mm ,偏少 305.9 mm 。1951—2017 年降水量呈下降趋势,气候倾向率为 $-11.02\text{ mm}/10\text{ a}$ 。1964 年降水量最大,达 1054 mm ,偏多 542 mm ,对应该年潜在蒸散量最小,湿润指

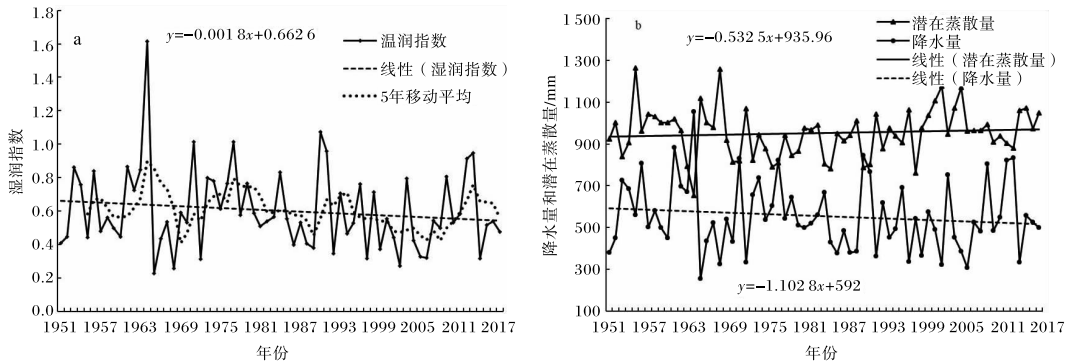


图1 1951—2017年德州湿润指数(a)、潜在蒸散量和降水量(b)变化趋势

数最大;1965年降水量最少,仅255.2 mm,偏少256.8 mm,对应该年湿润指数最小。分析5年移动平均,67 a年降水量变化趋势与湿润指数变化趋势基本一致^[16]。

1951—2017年德州市潜在蒸散量和降水量的气候年均值分别为959.1 mm和512 mm,潜在蒸散量大于降水量。1951—2017年德州湿润指数气候年均值为0.55,说明大气降水少于植被生理过程需水量,降水条件是当地植被生理需水的限制因子,属半湿润气候^[17]。按年代际分析,20

世纪70年代降水量最多,潜在蒸散量最小,湿润指数最大;2000年代降水量最少,潜在蒸散量最大,湿润指数最小,湿润状况最差;2000年代之后,随着降水量增加,湿润生态环境有所好转。湿润指数和降水量在2000年代为负距平,其余年代均为正距平。潜在蒸散量在20世纪50年代为正距平,60—90年代为负距平,2000年代之后为正距平。德州市湿润指数、潜在蒸散量、降水量气候值及年代际距平见表1。

表1 1951—2017年德州湿润指数(K)、降水量(R)、潜在蒸散量(E_T)的气候值及年代际距平

物理量	气候值	50年代	60年代	70年代	80年代	90年代	2000年代	2011—2017年
K	0.55	0.03	0.11	0.17	0.03	0.02	-0.05	0.06
R/mm	512	51.5	69.4	110	3	8.2	-11.2	76.5
E_T /mm	959.1	38.8	-7.5	-80.8	-46.7	-21.5	68.1	22.9

2.1.2 季、月变化 德州市1951—2017年平均四季潜在蒸散量(图略)分别为:春季313.9 mm、夏季362.1 mm、秋季193.2 mm、冬季85.6 mm。四季降水量为:春季69.4 mm、夏季379.5 mm、秋季91.1 mm、冬季14.4 mm。四季湿润指数为:春季0.24、夏季1.12、秋季0.52、冬季0.2。夏季降水量、潜在蒸散量、湿润指数最大;冬季降水量、潜在蒸散量、湿润指数最小;春季降水量小于秋季,但春季潜在蒸散量明显大于秋季,春季湿润指数明显小于秋季,德州市春季十年九旱。

德州市春季、夏季潜在蒸散量气候倾向率分别为2.446、1.654 mm/10 a;秋、冬季分别为4.25、5.0 mm/10 a,年潜在蒸散量增加主要是由

秋冬两季增加造成。德州市春季、秋季降水量气候倾向率分别为0.553、0.313 mm/10 a;夏季、冬季降水量分别为-11.817、-0.176 mm/10 a,年降水量减少主要是由夏季降水减少造成。四季湿润指数都呈减少趋势,春、夏、秋、冬气候倾向率分别为-0.003、-0.039、-0.021、-0.015 (10 a)⁻¹,夏季和秋冬季减小明显。夏季湿润指数减小,主要原因是夏季降水量明显减少,秋冬季湿润指数减小,主要原因是秋冬季潜在蒸散量明显增加。

图2为德州市1951—2017年平均各月潜在蒸散量、降水量和湿润指数分布图。6月潜在蒸散量最大,为171.6 mm,5月次之,为146.1 mm;1月最小为25.5 mm,12月次之,为27.2 mm。

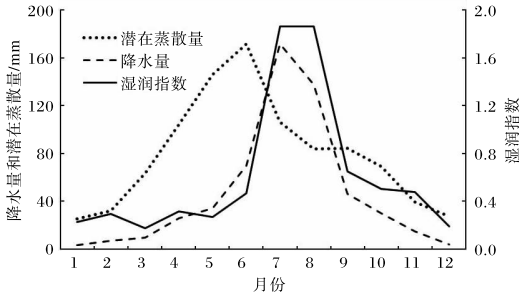


图2 1951—2017年德州平均潜在蒸散量和降水量及湿润指数月分布

表2 1951—2017年德州各月湿润指数(K)、降水量(R)、潜在蒸散量(E_T)气候倾向率

气候倾向率	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
$K/(10\text{ a})^{-1}$	-0.051	0.003	-0.008	-0.025	0.008	-0.019	-0.081	-0.125	0.007	-0.032	-0.026	-0.023	-0.018
$R/(\text{mm}/10\text{ a})$	-0.4	0.7	-0.2	-0.6	1.3	-0.8	-7.5	-3.5	1.4	-0.6	-0.5	-0.4	-11.0
$E_T/(\text{mm}/10\text{ a})$	1.2	2.361	4.509	-1.842	-5.114	-4.657	1.031	1.972	0.848	1.726	1.677	1.606	5.325

均为增加趋势,其余各月为减少趋势,8月湿润指数减少最明显,7月降水量减少最明显。4、5、6月潜在蒸散量为减少趋势,其余各月为增加趋势。

2.2 影响潜在蒸散量的主要气象因子

2.2.1 气象因子变化特征

对照潜在蒸散量计算公式,分析影响其变化的主要气象因子。1951—2017年德州平均气温变化呈明显上升趋势(图3a),气候倾向率为 $0.336\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。四季气温均呈上升趋势,春、夏、秋、冬季气候倾向率分别为 0.389 、 0.162 、 0.29 、 $0.499\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,冬季和春季增温明显。德州年平均风速变化呈明显下降趋势(图3b),气候倾向率为 $-0.18\text{ (m/s)}/10\text{ a}$ 。四季风速均为减小趋势,气候倾向率分别为 -0.263 、 -0.14 、 -0.156 、 $-0.171\text{ (m/s)}/10\text{ a}$ 。德州年平均相对湿度变化呈下降趋势(图3c),气候倾向率为 $-0.587\%/10\text{ a}$ 。四季均呈下降趋势,气候倾向率分别为 -0.095 、 -0.071 、 -0.742 、 $-1.422\%/10\text{ a}$ 。德州年平均气压变化呈略下降趋势(图3d),气候倾向率为 $-0.045\text{ hPa}/10\text{ a}$ 。除夏季升高外,其余季节均为降低趋势,夏季气候倾向率为 $0.099\text{ hPa}/10\text{ a}$,春、秋、冬季分别为 -0.189 、 -0.072 、 $-0.008\text{ hPa}/10\text{ a}$ 。

2.2.2 气象因子对潜在蒸散量变化的贡献率

将单个气象因子的敏感性系数乘以其多年相对变

化率,即为该要素对 E_T 变化的贡献率^[7],表3为年潜在蒸散量 E_T 对气象因子的敏感系数、各因子的多年相对变化率及其对 E_T 的贡献率。年 E_T 对平均气温、平均风速的敏感系数为正,与相对湿度和平均气压的敏感系数为负。相对湿度敏感系数的绝对值最大,说明 E_T 对相对湿度的敏感性最大,这与杨永刚^[18]等的研究结果一致;但相对湿度的多年相对变化率较小,对年 E_T 变化的贡献率排第二位。年 E_T 对平均气温的敏感系数排第二,但平均气温的多年相对变化率较大,对年 E_T 变化的贡献率排第一。平均风速的多年相对变化率最大,但与年 E_T 的敏感系数最小,对年 E_T 变化的贡献率排第三。平均气压的多年相对变化率最小,对年 E_T 变化的贡献率最小。平均气温、相对湿度、平均气压的贡献率为正,表示气温升高、相对湿度和气压减小引起 E_T 增加^[19-20],为正贡献;平均风速贡献率为负,表示风速减小引起 E_T 减少,为负贡献。

7月降水量最大,为 171.7 mm ,8月次之,为 138 mm ;1月最小为 3.5 mm ,12月次之,为 3.9 mm 。7月、8月湿润指数最大,为 1.86 ,大气降水大于植被生理过程需水量,但降水时空分布不均,旱涝并存;3月湿润指数最小,仅为 0.18 ,植被生理需水是最突出的限制因子。

表2为德州市1951—2017年各月湿润指数、降水量、潜在蒸散量气候倾向率。各月湿润指数与降水量的气候倾向率变化趋势一致,2、5、9月

表4为德州市67 a主要气象因子对潜在蒸散量 E_T 各月变化的贡献率和 E_T 的实际变化。各月平均气温均为正贡献率,各月平均风速均为负贡献率。相对湿度在4—6月为负贡献率,其余各月为正贡献率。气压在1月和7—9月为负贡献率,其余各月为正贡献率。1、9月平均气温贡献

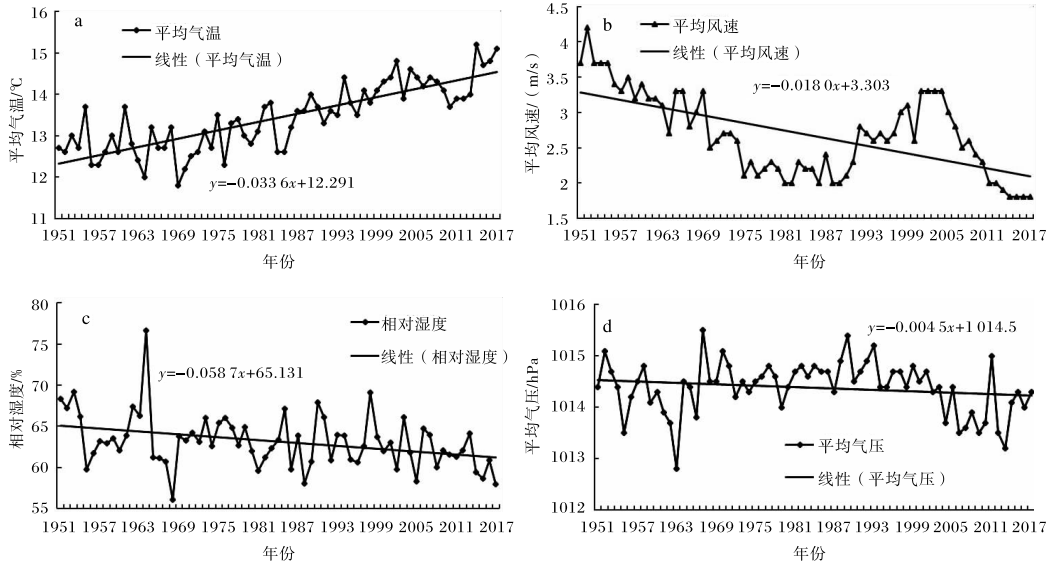


图3 1951—2017年德州平均气温(a)、平均风速(b)、相对湿度(c)、平均气压(d)变化趋势

表3 年潜在蒸散量对气象因子的敏感系数和各因子的多年相对变化率及其贡献率

气象要素	平均气温	相对湿度	平均风速	平均气压
敏感系数	0.848	-2.026	0.249	-0.500
相对变化率/%	1.676	-0.623	-4.484	-0.003
贡献率/%	1.420	1.262	-1.117	0.001

表4 各月气象因子对潜在蒸散量的贡献率和潜在蒸散量的实际变化值 单位:%

月份	$C_{on,T}$	$C_{on,U}$	$C_{on,F}$	$C_{on,P}$	C_{on}	$\Delta E_T/mm$
1	2.782	1.841	-1.171	-0.003	3.449	3.154
2	2.377	3.153	-1.233	0.004	4.301	4.908
3	2.799	3.071	-1.147	0.007	4.729	4.770
4	1.422	-0.975	-1.520	0.008	-1.065	-1.182
5	0.838	-1.771	-1.389	0.003	-2.319	-2.345
6	0.623	-0.971	-1.249	0.000	-1.598	-1.819
7	0.656	0.885	-0.849	-0.005	0.687	0.648
8	0.634	1.601	-0.610	-0.005	1.621	1.575
9	1.114	0.299	-0.752	-0.004	0.657	0.675
10	1.423	1.494	-1.129	0.002	1.790	1.664
11	1.179	3.026	-1.333	0.008	2.881	2.846
12	2.699	3.085	-1.010	0.000	4.773	3.956

注: C_{on} 为 4 因子的总贡献率, ΔE_T 为潜在蒸散量的实际变化值

率最大,4、6月平均风速贡献率最大,其余各月为相对湿度贡献率最大。各月平均气温、相对湿度、平均风速、平均气压4因子对 E_T 变化的总贡献率与 E_T 的实际变化基本一致,表明用敏感系数和多年相对变化率来解释德州各月潜在蒸散量变化的原因合理可行。

3 结论与讨论

(1)1951—2017年德州市湿润指数气候年均值为0.55,属半湿润气候。67a湿润指数呈下降趋势,气候倾向率 $-0.018(10a)^{-1}$,四季均为减少趋势,夏季和秋冬季减小明显。7、8月湿润指数最大,为1.86,大气降水大于植被生理过程需

水量,但降水时空分布不均,旱涝并存;3月湿润指数最小,仅0.18,且气候倾向率呈减少趋势,植被生理需水是最突出的限制因子,多发生干旱,应高度重视。

(2)德州市潜在蒸散量气候年均值为959.1 mm,67 a潜在蒸散量呈上升趋势,气候倾向率为5.325 mm/10 a,春、夏季呈减少趋势,秋、冬季呈增加趋势。降水量气候年均值512 mm,67 a降水量呈下降趋势,气候倾向率为-11.02 mm/10 a,春、秋季增加,夏、冬季减少。夏季降水量明显减少是夏季湿润指数减小的主要原因,秋冬季潜在蒸散量增加是秋冬季湿润指数减小的主要原因。潜在蒸散量呈增加趋势,会导致作物年需水量增加,作物需水矛盾将更加突出要合理规划种植布局,加强现代水利建设,提高水分有效利用率。

(3)德州市年潜在蒸散量对相对湿度的敏感性最大,其次是平均气温、平均气压、平均风速。平均气温对年潜在蒸散量变化的贡献率最大,其次是相对湿度、平均风速和平均气压。年潜在蒸散量对平均气温、平均风速的敏感系数为正,与相对湿度和平均气压的敏感系数为负。平均气温、相对湿度、平均气压的贡献率为正,平均风速的贡献率为负,表明潜在蒸散量随气温升高和相对湿度与气压减小而增加,随风速减小而减少。各月潜在蒸散量的实际变化与平均气温、相对湿度、平均风速、平均气压4因子的总贡献率基本一致,表明用该方法解释潜在蒸散量变化合理可行,但该4因子总贡献率与潜在蒸散量的实际变化有差值,还受日照等其他因子影响,需进一步研究。

参考文献:

- [1] 郭军,熊明明,黄鹤. 京津冀地区暖季降水日变化特征分析[J]. 海洋气象学报,2019,39(2):58-67.
- [2] 王劲廷. 湿润指数在我国江淮流域的适应性评估[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
- [3] 王允,刘普幸,曹立国,等. 基于湿润指数的1960—2011年中国西南地区地表干湿变化特征[J]. 自然资源学报,2014,29(5):830-837.
- [4] 汪彪,曾新民,刘正奇,等. 中国西北地区参考作物蒸散量的估算与变化特征[J]. 干旱气象,2016,34(2):243-251.
- [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.
- [6] 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.
- [7] 环海军,杨再强,刘岩,等. 鲁中地区参考作物蒸散量时空变化特征及主要气象因子的贡献分析[J]. 中国农业气象,2015,36(6):692-698.
- [8] 林子伦,郭丽娜,郭飞燕,等. 山东半岛夏季降水异常的环流型及影响因子分析[J]. 海洋气象学报,2019,39(1):55-67.
- [9] 郑丽娜. 近55a中国西北地区夏季降水的时空演变特征[J]. 海洋气象学报,2018,38(2):50-59.
- [10] 马丽,张熙,楚鹏,等. 山东省农业干旱脆弱性区划研究[J]. 气象科技,2017,45(3):535-541.
- [11] 石慧兰,王新堂,邵志勇,等. 德州生态质量气象评价中湿润指数定量分析[J]. 山东气象,2007(1):25-27.
- [12] 赵国强,陈立文,穆佳,等. 生态环境质量评价体系建设的探讨[J]. 气象与环境科学,2018,41(1):3-13.
- [13] 祁栋林,李甫,肖建设,等. 近53a来祁连山南北坡潜在蒸散量及地表湿润度变化趋势分析[J]. 干旱气象,2016,34(1):26-33.
- [14] 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.
- [15] 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):1160-1166.
- [16] 李凤,李毅,于强,等. 1961—2019年陕西省极端旱涝事件的时空演变规律[J]. 陕西气象,2020(6):23-29.
- [17] 张克峰,马波,张大龙. 山东省降水量、潜在蒸散量与湿润指数的时空分布[J]. 灌溉排水学报,2020,39(9):116-125.
- [18] 杨永刚,崔宁博,胡笑涛,等. 中国粮食主产区参考作物蒸散量演变特征与成因分析[J]. 中国农业气象,2018,39(4):245-255.
- [19] 高艳平. 运城市近46年作物生长季降水变化及农业旱涝特征分析[J]. 陕西气象,2020(4):34-39.
- [20] 王秋云,蔡艺友,方文维,等. 西南地区1971—2012年干旱变化特征分析[J]. 陕西气象,2020(6):30-35.