

DOI: 10.5846/stxb201910252238

曹永强, 齐静威, 王菲, 李玲慧, 路洁. 辽宁省潜在蒸散量演变规律及归因分析. 生态学报, 2020, 40(10): 3519-3525.

Cao Y Q, Qi J W, Wang F, Li L H, Lu J. Evolution law and attribution analysis of potential evapotranspiration in Liaoning Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3519-3525.

辽宁省潜在蒸散量演变规律及归因分析

曹永强*, 齐静威, 王 菲, 李玲慧, 路 洁

辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

摘要: 根据辽宁省 21 个气象站点 1965—2017 年的逐日实测气象数据, 利用 Penman-Monteith 法、小波分析法、敏感系数和因子分析法探究潜在蒸散量的时空变异规律及其主要气象要素多年变化定量分析。结果表明: (1) 从变化趋势来看, 在时间尺度上, 辽宁省潜在蒸散量下降趋势显著, 变化率为 2.89 mm/a, 多年平均值为 955.82 mm, 21 个气象站点中有 20 个气象站点潜在蒸散量呈递减趋势, 仅有 1 个气象站点呈递增趋势; 在空间尺度上, 辽宁省潜在蒸散量由西向东呈递减趋势。(2) 潜在蒸散量对相对湿度最为敏感, 对最低气温敏感性最小。(3) 平均风速是对潜在蒸散量影响最大的气象因子, 相对湿度与潜在蒸散量呈负相关。

关键词: 潜在蒸散量; Penman-Monteith 法; 时空分析; 因子分析; 辽宁省

Evolution law and attribution analysis of potential evapotranspiration in Liaoning Province

CAO Yongqiang*, QI Jingwei, WANG Fei, LI Linghui, LU Jie

School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: Based on daily meteorological data from 21 meteorological stations in Liaoning Province from 1965 to 2017, Penman-Monteith method, wavelet analysis method, sensitivity coefficient and factor analysis method were used to explore the spatiotemporal variation of potential evapotranspiration and the quantitative analysis of its main meteorological elements. The results show that: (1) from the perspective of the temporal change, the potential evapotranspiration in Liaoning Province has a significant downward trend, with a change rate of 2.89 mm/a and a multi-year average of 955.82 mm. The potential evapotranspiration of the 20 meteorological station has been decreasing, but that of one meteorological station has been increasing. On the spatial scale, the potential evapotranspiration of Liaoning Province decreased from west to east. (2) The potential evapotranspiration is most sensitive to relative humidity and least sensitive to minimum temperature. (3) The average wind speed is the meteorological factor that has the greatest influence on the potential evapotranspiration, and the relative humidity has a negative correlation with the potential evapotranspiration.

Key Words: potential evapotranspiration; Penman-Monteith method; spatiotemporal analysis; factor analysis; Liaoning Province

潜在蒸散是指在一定的气象条件下, 水分充分供给时某一固定区域下垫面可能达到的最大蒸散量, 它是水文循环以及能量平衡的重要环节^[1]。潜在蒸散量在作物需水量、气候条件以及水资源可持续发展等方面

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779114, 51579126); 大连市科技创新基金(2018J13SN116)

收稿日期: 2019-10-25; 网络出版日期: 2020-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

均得到了广泛应用^[2],因此,研究潜在蒸散量也对作物需水量的计算、水资源的合理配置提供了重要依据。

近年来,国内外学者对潜在蒸散量方面做了大量研究。国外倾向于对潜在蒸散量的估算方法研究,Valiantzas^[3]介绍了计算潜在蒸散量的彭曼公式,认为将本地平均风速作为附加输入时,公式的结果精度会进一步提高;Raziei 和 Pereira 等^[4]通过用彭曼公式对伊朗的潜在蒸散量进行估算,认为在伊朗东部、南部干旱和极度干旱的气候条件下,一些站点的性能较差。国内许多专家学者倾向于研究潜在蒸散量的时空变化特征,曹永强和李维佳^[5]研究发现 1966—2015 年辽宁省的潜在蒸散量时空差异性显著,并且在近 50 年整体上呈现递减趋势;钟巧等^[6]通过对博斯腾湖流域潜在蒸散量的计算发现,该流域山区与平原年均潜在蒸散量都呈现出先下降后上升的趋势;刘昌明和张丹^[7]认为我国各区域普遍存在“蒸发悖论”,全国范围内,影响潜在蒸散量最敏感的气象因子为水汽压。

辽宁省地形由山地、丘陵、平原构成,属温带大陆性季风气候,雨量不均,东湿西干,是气候变化敏感地区之一,潜在蒸散量变化及气象因子响应对于气候变化十分重要。研究潜在蒸散量变化及气象因子响应,对辽宁省生态保护和作物生长具有重要作用,但目前对潜在蒸散量与气象因子敏感性分析较多,对辽宁省长时间尺度下潜在蒸散量时空变异规律以及相关气象因子的分析研究较少。因此,本文在已有研究成果基础上,对辽宁省 21 个气象站点 1965—2017 年的潜在蒸散量时空变异规律以及相关气象因子进行分析,为该区农业水资源优化管理、作物合理布局及灌溉的高效利用建立提供一定参考依据。

1 研究资料与方法

1.1 研究区概况与数据来源

辽宁省位于中国东北地区的南部,118°53′—125°46′E,38°43′—43°26′N 之间。南濒黄、渤二海,雨热同期,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,多年平均气温 7—11℃,年均降水量 750 mm,年日照时数 2543 h。

本文所需气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),选取辽宁省 21 个气象站点 1965—2017 年逐日最高气温、最低气温、相对湿度、风速、日照时数等气象数据,对缺测数据采用线性插补法进行处理,具体气象站点的分布如图 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 Penman-Monteith (P-M) 法

大量研究表明联合国粮农组织(FAO)在 1998 年修正的 Penman-monteith (P-M) 法是目前计算潜在蒸散量 ET_0 最为精确和最常用的估算方法之一^[8-9],其计算公式如下:

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

式中, ET_0 代表站点潜在蒸散量(mm); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率值(kPa/℃); R_n 代表地面净辐射量(MJ/m²); G 代表土壤热通量(MJ m⁻² d⁻¹); γ 代表湿度计常数(kPa/℃); T 代表日平均温度(℃); U_2 代表 2 m 高度处风速(m/s); e_s 代表饱和水汽压(kPa); e_a 代表实际水汽压(kPa/℃)^[10]。各因子具体计算公式详见参考文献^[11]。

1.2.2 小波分析法

Morlet 小波分析目前多应用于数学与工程领域,是一种强有力的处理非稳定信号的统计工具。该方法能

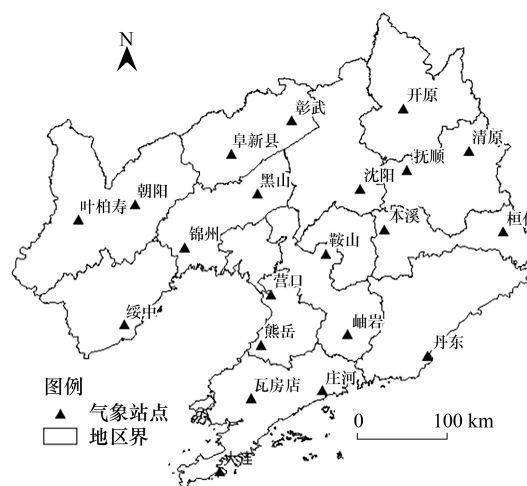


图 1 辽宁省气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial Distribution of Meteorological Stations in Liaoning Province

够同时从时域和频域揭示时间序列的局部特征^[12],常用来分析气候序列中所包含的周期性及其不均匀性。

1.2.3 敏感系数

McCuen^[13]于1973年提出敏感系数法,该方法基于偏导数的形式计算蒸散发变化量与气象因子变化量之比,表达简洁操作简单。本文利用无量纲相对敏感系数,分析辽宁省潜在蒸散量对各气候因子变化的敏感程度。具体计算公式如下:

$$S_{v_i} = \lim_{\Delta v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta v_i / v_i} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial v_i} \cdot \frac{v_i}{ET_0} \quad (2)$$

式中, S_{v_i} 为潜在蒸散量 ET_0 对某气象因子 x 的敏感系数,其特点在于通过变化率将各气象因子无量纲化,便于不同气象因子之间的比较^[14],这种方法广泛应用于潜在蒸散量研究中。敏感系数的绝对值越小,气象因子对 ET_0 的影响越小^[7];敏感系数为正表明气象因子与 ET_0 变化趋势一致,敏感系数为负则表明两者变化趋势相反。

1.2.4 因子分析

因子分析是指从研究指标内部关系出发,用少数或几个潜在的具有代表性的公共因子去解释原始数据的一种多元统计分析方法^[15]。本文采用SPSS软件对辽宁省1965—2017年的21个气象站点影响潜在蒸散量的5个气象因子进行因子分析。

2 结果与分析

2.1 时空变化特征

2.1.1 辽宁省 ET_0 年际变化特征

辽宁省 ET_0 年际变化如图2所示。由图可知,1965—2017年辽宁省年平均 ET_0 呈显著下降趋势,变化率为2.89 mm/a。多年平均值955.82 mm,2010年出现 ET_0 最小值,为820.90 mm,1974年出现 ET_0 最大值,为1149.16 mm;整体上来看,辽宁省 ET_0 年际变化较大,呈现阶段性起伏变化,反映了气象因子对潜在蒸散量的影响。在M-K突变检测中(图3),由潜在蒸散量UF曲线可知,1965—2017年辽宁省 ET_0 呈下降趋势。根据UF和UB交点的位置,确定UF和UB曲线在1978年出现突变点,表明辽宁省潜在蒸散量在1978年发生下降趋势突然增大的现象。1965—1978年 ET_0 呈减少趋势,但并未超过0.05显著水平临界线(-1.96),表明1978年以前辽宁省潜在蒸散量减少趋势不明显。1978—2017年 ET_0 减少的趋势超过0.05显著水平临界线,表明1978年以后辽宁省潜在蒸散量下降趋势十分显著。1975—1980年辽宁省降水量大幅减少^[16],也可能是潜在蒸散量下降的原因。

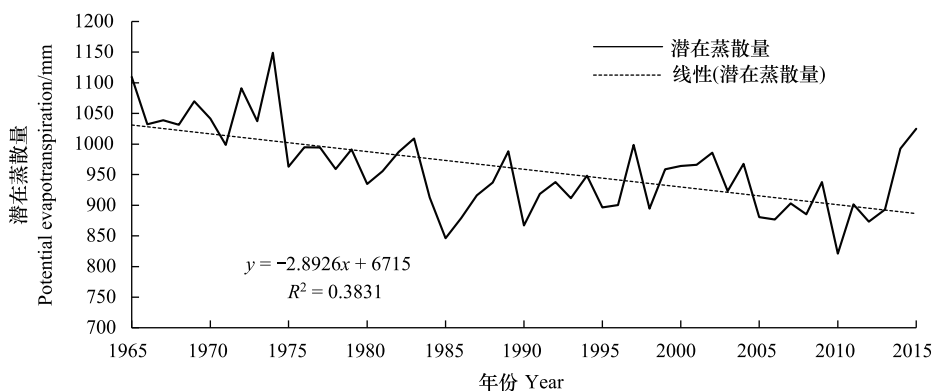


图2 辽宁省潜在蒸散发量时间变化趋势

Fig.2 Time trend of ET_0 in Liaoning Province

对辽宁省 21 个气象站点潜在蒸散量的趋势变化进行分析,并进行显著性检验。如图 4 所示,辽宁省 21 个气象站点中有 20 个气象站点潜在蒸散量呈递减趋势,其中 14 个气象站点通过了 0.01 显著性检验,3 个气象站点通过了 0.05 显著性检验,仅有 3 个气象站点未通过显著性检验(瓦房店站、营口站、彰武站)。仅有 1 个气象站点潜在蒸散量呈递增趋势(阜新县站),且未通过显著性检验。整体来看,辽宁省 21 个气象站点潜在蒸散量呈下降趋势变化。

2.1.2 周期变化分析

将各年份 ET_0 通过小波分析得出小波变换等值线及小波方差图(图 5)。从图 5 可知,小尺度变化镶嵌在较大尺度下的复杂环境当中。1965—2017 年辽宁省 ET_0 在 20—35 年尺度上振荡周期最明显, ET_0 在周期震荡中存在“大—小—大”的变化特征,此外,在 13—15 年尺度上也存在若干小周期循环。为了进一步明确 ET_0 随时间变化的主周期,绘制小波方差分析图,分析得出:辽宁省 ET_0 在 35 年左右尺度下的小波方差极值最大,是主周期;其次在 20 年左右还存在一个峰值,峰值数值较小,为次周期,即辽宁省潜在蒸散量在 35 年左右会经历由多变少的变化过程。

2.1.3 辽宁省 ET_0 空间变化特征

对 ET_0 多年平均数据进行空间分析(图 6)发现,辽宁省年均潜在蒸散量地域差异十分显著,表现出由西向东逐渐减小的趋势,最高值(1043.58 mm)出现在辽宁省西部的朝阳站,朝阳地处大陆性季风气候区,北部为内蒙古高原,经常性风速较大的干燥冷空气侵入,是造成该地区潜在蒸散量大的重要原因。最低值(497.52 mm)位于辽宁东部的清原站,由于所处地区气候特点不同导致各区域潜在蒸散量存在明显空间差异。辽宁西部地区位于辽宁辽河以西与内蒙古河北接壤处,气候类型为半干旱气候^[17],该区域日照丰富,所以潜在蒸散量较大。辽宁东部地区位于辽河以东,该区濒临黄海、渤海,气候湿润,降水量较多,相对湿度偏大,是潜在蒸散量较小的主要原因。

2.2 敏感性分析

为了研究辽宁省 ET_0 对气候变化的敏感程度,综合考虑辽宁省各地的气候特点以及省内空间分布,选取叶柏寿站、清原站、大连站、开原站、营口站、锦州站、鞍山站、丹东站、抚顺站以及本溪站 10 个气象站作为研究对象,计算 10 个气象站潜在蒸散量对气候因子的敏感系数(表 1)。10 个气象站的潜在蒸散量对相对湿度的敏感系数皆为负值,且敏感系数的绝对值也最大,大连更达到了 1.21,表明如果相对湿度减少 10%,则潜在蒸散量增加 12.1%。潜在蒸散量与最低气温、最高气温、平均风速以及日照时数均呈正敏感,这 4 个影响因子中,潜在蒸散量对最高气温、平均风速及日照时数的敏感系数十分接近。潜在蒸散量对最低气温的敏感系数最小,几乎为零,敏感性最低,主要原因是夜晚温度一般为一天中的最低气温,而夜晚是一天中蒸散发最弱的

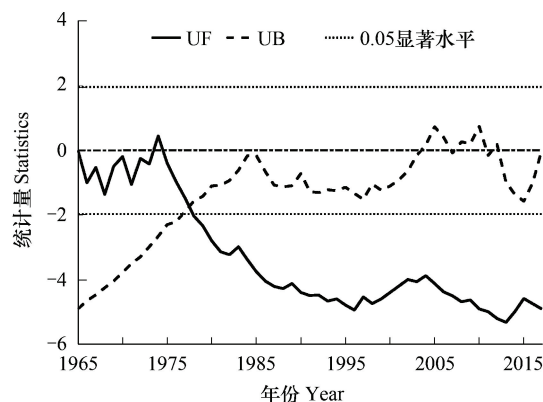


图 3 潜在蒸散量 M-K 检验结果

Fig.3 M-K test results of potential evapotranspiration

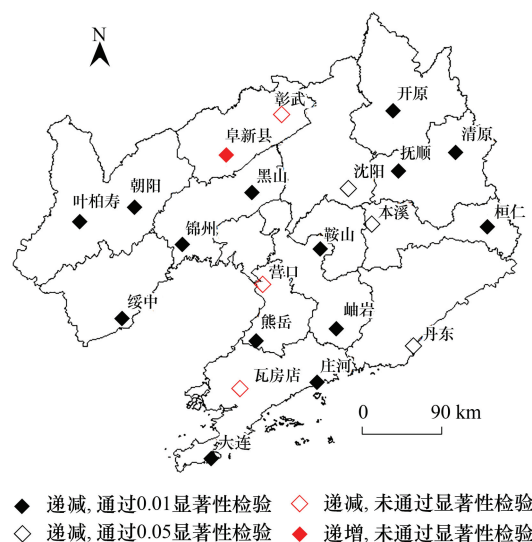
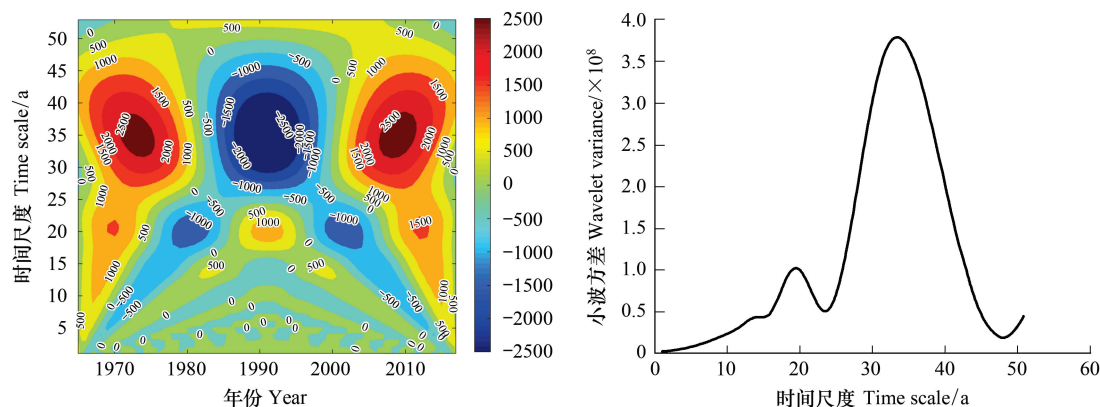


图 4 潜在蒸散量变化趋势空间分析

Fig.4 Spatial distribution of ET_0 trend test results

图5 辽宁省 ET_0 周期变化特征Fig.5 Characteristics of ET_0 periodic change in Liaoning Province

时间,这与李耀军等^[18]研究甘肃省潜在蒸散量的研究结果一致。从空间尺度上来看,在经度和纬度改变的情况下,计算发现 ET_0 对最低气温、最高气温、平均风速、日照时数的敏感系数基本保持不变,而相对湿度在经度、纬度变化的情况下呈现出无规律的起伏变化趋势,并且潜在蒸散量对相对湿度的敏感系数在各种情况下绝对值都为最大,这说明潜在蒸散量对相对湿度的敏感性最高,不因地区的不同而改变。

2.3 因子分析

本文利用 SPSS 统计分析软件,得出所选取的 5 个气象因子的共同度取值都在 0.5 以上,表明适合采用因子分析。由表 2 可知,成分 1 是方差贡献最大的一个主成分,方差贡献率为 53.999%。另外,在 5 个变量因子中,其起始特征值大于 1 的有 2 个成分,这 2 个成分的方差贡献率分别为 53.999%、27.658%,累计方差贡献率为 81.658%,这说明了起始特征值大于 1 的有 2 个成份可以解释原来 5 个变量 81.658% 的信息,表示分析时只需提取前 2 个公共因子即可。

通过因子分析法提取两个主成分进行主成分分析,得到各主成分的荷载矩阵(表 3)。

第一个主成分的方差贡献率(53.999%)最大,主要在最高气温上的荷载较大,表明气温上升是潜在蒸散量升高的主要影响因子,但潜在蒸散量不仅只随温度改变而变化,其他气象因子的作用也影响潜在蒸散量的变化。其中在相对湿度上荷载为-0.244,表明相对湿度增加,潜在蒸散量反而减少。

第二个主成分的方差贡献率(27.658%)明显低于第一个主成分。第二个主成分主要在平均风速和日照时数两个指标上的荷载较大,说明平均风速和日照时数的增加在某种程度上成为潜在蒸散量上升的因素,相对湿度在第二主成分的荷载为-0.262,说明相对湿度对潜在蒸散量的上升有制约作用。综上所述,最高气温、日照时数和平均风速对区域潜在蒸散量影响显著,相对湿度对区域潜在蒸散量呈负相关影响。不同因子对潜在蒸散量影响程度不同,其中平均风速是潜在蒸散量的主要影响因子,辽宁省地处温带大陆性季风气候区,受天气系统及海陆热力差异影响,平均风速较大,尤其东南部沿海地区^[19]。但近 35 年中国地面风速呈递减趋势,东北地区平均风速下降趋势最为明显^[20]。辽宁省处在东亚季风区,有研究表明,温室气体的排放及气溶

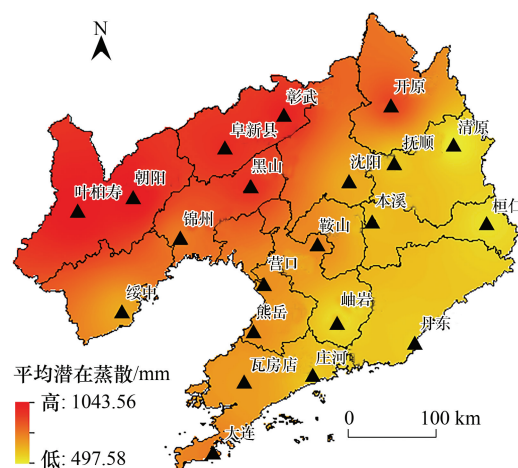


图6 潜在蒸散量空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ET_0

胶的变化,导致东亚夏季风和冬季风正处在减弱趋势时期,季风减弱则导致平均地面风速下降^[21],该变化是造成辽宁省潜在蒸散量呈下降趋势的重要因素。由于人类破坏环境愈发严重,太阳辐射量日渐减少,日照时数也呈减少趋势,导致地面接收的辐射能量减少,潜在蒸散量下降。据研究表明,辽宁省近些年及未来 40 年气候呈暖干趋势^[22],相对湿度下降,促进潜在蒸散量上升,但由于最低气温、最高气温、日照时数、平均风速 4 个气象因子与潜在蒸散量呈正相关,与相对湿度的负相关抵消,从而最终导致潜在蒸散量整体呈下降趋势。

表 1 10 个气象站潜在蒸散量气候敏感系数

Table 1 Climate sensitivity coefficient of potential evapotranspiration at 10 typical stations

气象站 Weather station	最低气温 Minimum temperature	最高气温 Maximum temperature	相对湿度 Relative humidity	风速 Wind speed	日照时数 Sunshine hours
叶柏寿	0.02	0.19	-0.46	0.26	0.17
清原	0.04	0.12	-0.85	0.18	0.17
大连	0.05	0.22	-1.21	0.23	0.14
开原	0.03	0.17	-1.00	0.23	0.16
营口	0.01	0.20	-1.11	0.23	0.16
锦州	0.01	0.24	-0.85	0.27	0.23
鞍山	0.01	0.21	-0.77	0.27	0.21
丹东	0.02	0.14	-1.07	0.19	0.17
抚顺	0.03	0.16	-1.02	0.21	0.16
本溪	0.02	0.16	-0.86	0.23	0.16

表 2 因子分析过程解释的总方差表

Table 2 Total variance table for factor analysis process interpretation

元件 Element	起始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extract square sum load			循环平方和载入 Cyclic sum loading		
	总计	方差的/%	累加/%	总计	方差的/%	累加/%	总计	方差的/%	累加/%
1	2.700	53.999	53.999	2.700	53.999	53.999	2.355	47.102	47.102
2	1.383	27.658	81.658	1.383	27.658	81.658	1.728	34.556	81.658
3	0.733	14.661	96.319						
4	0.151	3.021	99.340						
5	0.033	0.660	100.000						

提取方法为主成分分析

表 3 潜在蒸散发影响因子主成分分析表

Table 3 Principal component analysis table of potential evapotranspiration influencing factors

	最低气温 Minimum temperature	最高气温 Maximum temperature	平均风速 Average wind speed	日照时数 Sunshine hours	相对湿度 Relative humidity
主成分 1 Main ingredient 1	0.163	0.384	0.204	0.045	-0.244
主成分 2 Main ingredient 2	0.231	0.051	0.565	0.460	-0.262

3 结论

(1)从时空变异规律来看,辽宁省 1965—2017 年潜在蒸散量多年平均值为 955.82 mm,变化速率为 2.89 mm/a,下降趋势显著。在空间上不同地区的潜在蒸散量差异明显,表现出由西向东逐渐减少的趋势。

(2)辽宁省潜在蒸散量对相对湿度的敏感性为负,且最为敏感;对最低气温、最高气温、风速、日照时数均呈正敏感,且对最低气温敏感性最小,几乎为零。在经度和纬度改变的情况下,最高气温、风速、最低气温、日

照时数的敏感性几乎没有改变,而相对湿度的敏感性呈现无规律的阶段性起伏变化。

(3) 平均风速是潜在蒸散量变化的主要影响因子,相对湿度与潜在蒸散量呈负相关,表明相对湿度增加,则潜在蒸散量呈减少趋势。几个气象因子综合作用导致辽宁省潜在蒸散量呈显著下降趋势。

4 讨论

本文基于小波分析、敏感性分析和因子分析,定量分析与定性分析相结合,深入研究了辽宁省潜在蒸散量的时空变化特征及成因。结果表明,辽宁省近 53 年年均潜在蒸散量呈下降趋势,平均风速与日照时数的减少是辽宁省潜在蒸散量下降的主要原因,气温上升并未导致潜在蒸散量上升,表明辽宁省存在“蒸发悖论”的现象,这与丛振涛等^[23]东北地区的研究结果一致。但是本文仅从潜在蒸散量传统公式方面分析了它的时空变化特征,并未通过“蒸发悖论”成因与规律探究辽宁省潜在蒸散量的变化趋势,结合下垫面要素、农业活动等人为因素对潜在蒸散量的影响,潜在蒸散量的变化趋势特征还有待进一步探讨。另外,影响因子分析中发现平均风速下降是辽宁省潜在蒸散量下降的主要影响因子,但本文仅仅进行了初步探究,其他气象要素以及植被、人为因素、地形等对潜在蒸散量的影响需要进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 安彬,肖薇薇. 陕西省潜在蒸散发的敏感性及其变化成因分析. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 90-97, 113-113.
- [2] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength. *Nature*, 1995, 377(6551): 687-688.
- [3] Valiantzas J D. Temperature-and humidity-based simplified Penman's ET_0 formulae. Comparisons with temperature-based Hargreaves-Samani and other methodologies. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 326-334.
- [4] Raziei T, Pereira L S. Estimation of ET_0 with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 2013, 121: 1-18.
- [5] 曹永强,李维佳. 辽宁省潜在蒸散时空变化特征与成因. 生态学报, 2018, 38(20): 7276-7287.
- [6] 钟巧,焦黎,李稚,焦伟,陈亚宁. 博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析. 干旱区地理, 2019, 42(1): 103-112.
- [7] 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. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588.
- [8] Chen D L, Gao G, Xu C Y, Guo J, Ren G Y. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Climate Research*, 2005, 28(2): 123-132.
- [9] Temesgen B, Echting S, Davidoff B, Frame K. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(1): 73-84.
- [10] 张晓琳,熊立华,林琳,龙海峰. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用. 干旱区地理, 2012, 35(2): 229-237.
- [11] 史建国,严昌荣,何文清,刘克礼,刘勤. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析. 干旱区研究, 2007, 24(6): 773-778.
- [12] 曹永强,李维佳,朱明明. 河北省冬小麦、棉花全生育期缺水时空特征分析. 水土保持研究, 2018, 25(6): 348-356, 364-364.
- [13] McCuen R H. A sensitivity and error analysis CF procedures used for estimating evaporation. *Journal of the American Water Resources Association*, 1974, 10(3): 486-497.
- [14] Zheng H X, Zhang L, Zhu R R, Liu C M, Sato Y, Fukushima Y. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): W00A19.
- [15] 宁连举,李萌. 基于因子分析法构建大中型工业企业技术创新能力评价模型. 科研管理, 2011, 32(3): 51-58.
- [16] 杨东,刘洪敏,郭盼盼,郑凤娟,刘强. 1956~2008 辽宁省近 53 年的降水量变化. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 96-101.
- [17] 郭金路,谷健,杨筑筑. 辽西地区潜在蒸散发敏感性分析及变化成因研究. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 121-128.
- [18] 李耀军,魏霞,苏辉东. 近 30 年甘肃省潜在蒸散发时空变化特征及演变归因的定量分析. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 219-225.
- [19] 熊敏途. 近 30 年中国地面风速分区及气候特征. 高原气象, 2015, 34(1): 39-49.
- [20] 王楠,游庆龙,刘菊菊. 1979—2014 年中国地面风速的长期变化趋势. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1531-1542.
- [21] 王会军,范可. 东亚季风近几十年来的主要变化特征. 大气科学, 2013, 37(2): 313-318.
- [22] 赵俊芳,郭建平,徐精文,毛飞,杨晓光,张艳红. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势. 农业工程学报, 2010, 26(8): 18-24.
- [23] 丛振涛,倪广恒,杨大文,雷志栋. “蒸发悖论”在中国的规律分析. 水科学进展, 2008, 19(2): 147-152.