

DOI: 10.5846/stxb201711102013

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): - .

Cao Y Q, Li W J. Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in Liaoning province. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

辽宁省潜在蒸散时空变化特征与成因

曹永强*, 李维佳

辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029

摘要: 潜在蒸散量是衡量变化环境下区域水热资源演变的重要参数, 探究其历史变化规律及制约因素对预测农业用水走势乃至合理制定相关决策都至关重要。基于辽宁省 23 个气象站点 1966—2015 年的逐日气象数据, 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型与偏相关性检验法辨识辽宁省近 50 年潜在蒸散量的时空特征及其影响因素。结果表明: 辽宁省各监测站年平均潜在蒸散量为 453—1043 mm, 多年变化趋势以 1.43 mm/a 的速度递减, 并于 2003 年发生突变。此外, 其时空差异性较为显著。在年代际尺度上表现为, 辽西北至辽西南逐次降低; 在季节尺度上表现为, 夏季潜在蒸散量最高、春秋季节次之、冬季最低; 日最高气温、日最低气温和日照时数的减少共同导致过去 50 年辽宁省潜在蒸散量在整体上表现出减少的趋势。该研究成果可以为水资源的优化配置, 评价区域干湿程度等提供一定的理论支撑。

关键词: 潜在蒸散量; 时空特征; 影响因子; 辽宁省

Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in Liaoning province

CAO Yongqiang*, LI Weijia

School of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: Potential evapotranspiration is an important parameter to measure the evolution of hydrothermal resources in a changing environment. It is essential to explore the history of the potential evapotranspiration rules and constraints to predict the trend of agricultural water and make relevant management decisions. The daily meteorological data from 23 meteorological stations in Liaoning province from 1966 to 2015 were analyzed in this study using the Penman-Monteith model recommended by FAO and the partial correlation test. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration and its influencing factors in Liaoning Province in the last 50 years were identified. The results show that the annual average potential evapotranspiration of all monitoring stations in Liaoning Province is 453—1043 mm, with the multiyear trend decreasing at a rate of 1.43 millimeters per year and suddenly increased in 2003. In addition, the temporal and spatial differences of potential evapotranspiration in northwestern Liaoning are significant. It is shown that the potential evapotranspiration gradually decreases from northwest to southwest Liaoning on the interdecadal scale. Additionally, the highest potential evapotranspiration occurs in the summer, followed by spring and autumn, with the lowest occurring in winter, which is on the seasonal scale. The daily maximum temperature, the daily minimum temperature, and the decrease of sunshine hours resulted in the decrease in the potential evapotranspiration in Liaoning in the last 50 years. Together, the research results can provide some theoretical support for the optimal allocation of water resources and evaluation of the degree of regional wetness and dryness.

基金项目: 国家自然科学基金(51579126, 51779114)

收稿日期: 2017-11-10; 网络出版日期: 2018-00-00

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

Key Words: potential evapotranspiration; spatio-temporal distribution characteristics; Influence factor; Liaoning province

气候变化已导致全球的气温、降水和蒸散量发生显著变化^[1]。百年来,我国均温约升高 0.5—0.8℃。由于气温的不稳定上升,地区间降水的波动性较大^[2],潜在蒸散量(*potential evapotranspiration*, ET_0)也随之发生变化,潜在蒸散量是指在水充分供给的条件下,区域下垫面的最大蒸散量,并且作为地表水循环和全球能量平衡中的一个关键环节,其时空演变特征是表征水文资源和生态环境对全球变化响应的重要指标^[3]。另外,潜在蒸散量也是拟定农作物灌溉制度的基本依据,对于预测分析气候演变对农作物的影响、作物对水分的需求量以及农业干湿状况的分布情况具有十分重要意义^[4]。

近年来,国内外专家学者在潜在蒸散量演变因子与驱动机制等方面有了不少研究,其中美国^[5]、泰国^[6]和印度^[7]等国家的研究表明,由于日照时数和风速的减少, ET_0 整体上表现为递减趋势;Mcvicar 等^[8]认为在分析 ET_0 的变化趋势时,应考虑温度、日照时数、大气湿度和风速等气象因子;Chattopadhyay^[9]和 Peterson^[10]等人认为美前苏联、美国和印度等地区 ET_0 降低主要是因为日照时数的减少与北半球空气湿度的增加;而 Roderick^[11]等人认为新西兰和澳大利亚 ET_0 的减少是因为南半球气溶胶浓度与云量的增加。我国许多专家学者在对区域间 ET_0 变化成因与特征的分析上做了大量工作。相关研究表明,中国 ET_0 的空间区域分布特征差异显著;陈莉等^[12]认为东北地区 ET_0 的特点为东南较多西北较少,且随着纬度的增加 ET_0 递减特征显著;刘宪锋等^[2]研究发现西北地区全年及各季影响 ET_0 变化的主导因素为风速,但风速在不同季节、不同区域的影响范围有所差异;王琼等^[13]通过对南方长江流域 ET_0 评估发现,在季节上除秋季增加趋势比较明显外,其他各季均表现为不同程度的减小趋势;谢平等^[14]认为西南地区 ET_0 对气候影响因素的敏感程度从大到小分别为:温度、相对湿度、太阳辐射、风速,相对湿度为高敏感因子,但对 ET_0 的影响低于太阳辐射量和温度。

辽宁省东西和南北的宽度基本一致,总面积为 14.8 万 km^2 ,位于亚欧大陆东岸,是我国重要的经济强省。辽宁省的农业发展程度趋于领先地位,现代农业也逐渐成为了发展规划的重中之重,但同时也是受农业气象灾害与洪涝灾害影响最严重、灾害发生最频繁的地区之一^[15],潜在蒸散量异常变化会影响一个地区的水热平衡和气候的干湿状况,导致水资源短缺、水库和灌溉缺水变化,从而诱发洪涝或干旱等气象灾害,严重威胁着作物生长。另外,从气候方面来说,辽宁省因常年受副热带高气压带的影响,形成了典型的温带大陆性季风气候,蒸散量作为气候响应及水分循环中不可或缺的部分显得尤为重要。鉴于以往研究均局限于气温与降水的变化趋势及特征分析,鲜有对辽宁省蒸散发时空变化特征与成因及时空特征背景下的驱动机制分析的深入探讨。故此,在已有研究成果的基础上,本文分析辽宁省潜在蒸散时空变化特征及变化成因,以期为水资源管理部门提供参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

辽宁省位于我国东北南部,濒临黄海、渤海,与山东半岛隔渤海海峡,38°43'—43°26'N、118°53'—125°46'E 之间。全省有 14 个地级市,其中沈阳市为省会,辽宁省同时也是国家区域中心城市,地级市下属的市辖区为 57 个。辽宁省夏季温和多雨、冬季寒冷而少雨,且日照时数长。研究区内近 50 年(1966—2015 年)平均气温 2—10℃,年均降水量 500—1000 mm,且降雨年际间与年内差异性显著,致使辽宁省地区旱涝灾害频发,不仅如此,由于省内的工业化城市较多,工业生产需水量巨大,这样就导致地表供水量增加,辽宁省缺水现象持续恶化。

本文所用的气象数据来源于辽宁省 23 个气象站点的气象资料。气象数据来源于国家气象数据平台^[16](<http://data.cma.cn/>)提供的逐日气象数据集,包括降雨、平均风速、平均气温、平均相对湿度、日照时数、最高气温、最低气温、平均气压、平均水气压。经过数据的准确性与质量筛查后,选出数据较完整的 23 个气象站点(图 1),对于其中不完整的数据采用该日前后两天的平均值代替。

1.2 研究方法

1.2.1 潜在蒸散

采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法计算 ET_0 , 该方法兼顾了作物生理特征及空气动力学参数变化适用于不同地区估算蒸散量,且精度较高且计算误差小,是目前广泛认可并应用的公式之一。但此方法不足之处在于其形式复杂,参数较多,我国目前能提供如此详细数据的气象站点相对较少且时间序列参差不齐,研究区域可选取的气象站点具有一定局限性。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

$$R_n = 0.77 \times \left(0.248 + 0.752 \frac{n}{N}\right) R_{so} - \sigma \left[\left(\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right) \right] \times (0.56 - 0.08\sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \quad (2)$$

式中, ET_0 为逐日作物蒸散量 (mm), 采用 Penman-Monteith 公式计算; Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率值 (kPa/°C); R_n 为作物表面的净辐射量 (MJ/m²); 其中, R_{so} 为晴天辐射 (MJ m⁻² d⁻¹); n 为实际日照时数 (h), N 为最大日照时数 (h); T_{\max} 、 T_{\min} 分别为绝对温标的最高和最低气温 (K); γ 是湿度计常数 (kPa/°C); T 为日平均气温 (K); u_2 为 2m 高处风速 (m/s); G 为土壤热通量 (MJ m⁻² d⁻¹), 日土壤热通量非常小, 往往可以忽略, 计算中按 0 处理; e_s 为空气饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa/°C)。

1.2.2 偏相关检验

偏相关系数 (*Partial correlation coefficient*) 是多元回归分析中, 在消除其他因素影响条件下, 计算的某两个变量之间的相关系数。本文采用 SPSS 软件辽宁省近 50 年的 23 个气象监测站点的潜在蒸散和气象因子年平均进行偏相关检验。

1.2.3 变化趋势分析

利用最小二乘法建立年平均 ET_0 与时间的一元线性方程, 用于分析辽宁省近 50 年 (1966—2015 年) ET_0 线性变化特征。方程的线性拟合斜率 k 表示年平均 ET_0 的变化趋势, 即正值表示年平均潜在蒸散呈逐次递增, 负值则代表逐次降低。

1.2.4 数据处理与图像分析方法

反距离权重法 (IDW) 是基于 GIS 平台的一种运用最普遍的插值方法, 该方法假定气象站点的气象因子数值不存在潜在的全局趋势, 只用局部因子就能够很好的预估未知值, 相对于传统插值方法精度较高^[17-18]。本文利用反距离权重插值法来实现辽宁省潜在蒸散量的空间变化趋势。

曼-肯德尔法 (Mann-Kendall) 是一种非参数统计检验方法。该方法借助 Matlab 软件的程序编写对序列数据进行计算, 得到 UF 与 UB 两条曲线, 并用于检验序列的变化趋势。若 UF 或 UB 的值大于 0, 则表示序列呈上升趋势, 小于 0 则表示序列呈下降趋势。当 UF 与 UB 两条曲线出现交点时, 且交点在临界值之间则表示该时刻为突变开始时刻^[19]。本文运用曼-肯德尔法对辽宁省潜在蒸散量时间变化趋势进行分析, 得到潜在蒸散在研究时段内的突变点时刻。

2 结果与分析

2.1 年平均潜在蒸散空间分布

根据公式 (1) 计算得出辽宁省地区近 50 年各站点平均潜在蒸散量为 453—1043 mm, 如图 2 所示, 从大的

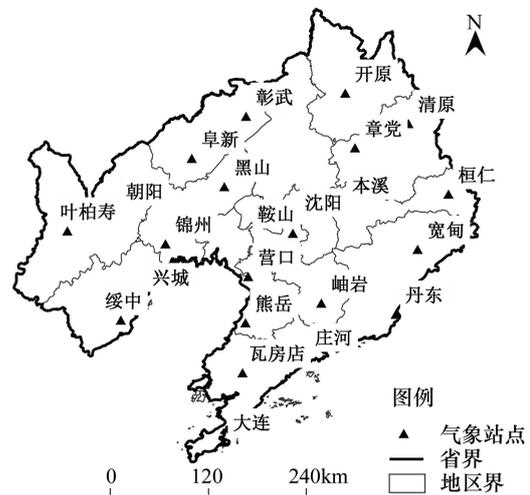


图 1 气象站点分布图

Fig.1 Weather station distribution map

范围来看,总体上表现为由东向西逐渐增大的趋势,且中部地区平均潜在蒸散量在东西方向上的变化较大,东部和西部地区在东西方向上的变化较小。从局部范围上来看,潜在蒸散量高值区主要分布在辽宁省西北部,大致为 927—1043 mm,其中高值区朝阳、彰武的潜在蒸散量最大,分别为 1043.58 mm 和 975.08 mm,这主要是由于彰武和朝阳临近内蒙古科尔沁草原的沙缘地带,属季风边缘带,风沙大、日照强烈且雨水稀少,因此潜在蒸散量大。潜在蒸散量低值区主要分布在辽宁省东部,年平均潜在蒸散量大致为 453—526 mm,其中低值区宽甸和清原地区潜在蒸散量最小,分别为 453.10 mm 和 497.52 mm,这可能是因为宽甸和清原地区濒临黄、渤二海,空气相对湿度大,降水偏多,因此潜在蒸散量较少。

图 2 将潜在蒸散量与地形条件相结合可知,由于丘陵山地地区海拔较高,大气透明度较大,使该地区光照充足、空气稀薄、辐射强烈,东北部低山区和西部山地丘陵地区地势较高的地方气候条件与中部辽河平原区有很大不同,因此会导致区域内水分盈亏量随海拔发生变化,潜在蒸散量也随之变少。在辽宁省的丘陵和山地地区随着海拔高度的变化,日照时数和太阳辐射在区域分布上的影响显著超过了地理纬度因子的影响。而中部为辽河平原区,除上述的影响因子之外,该区同时也是玉米集中的种植区域,是辽宁省主要产粮基地,在农作物的生长期时,由于充分的日照以及降水和此时的作物系数都达到最大,导致辽宁中部地区年平均潜在蒸散量值较大。

2.2 四季平均潜在蒸散空间分布

全省范围内,夏季各气象监测站点的潜在蒸散量平均值最高,为 244 mm,其次是春季 232 mm 和秋季 163 mm,冬季最低为 77 mm,分别占全年的 34%、32%、23% 和 11% (图 3)。夏季的潜在蒸散量最高值出现在朝阳,为 397 mm;冬季的潜在蒸散量最低值出现在清原,为 47 mm。

春季,辽宁省潜在蒸散量总体上表现为由东向西呈逐渐增加的趋势,一般变化范围为 134—375 mm,其中,西北部潜在蒸散量较高,一般为 322—375 mm,最高值出现在朝阳 375 mm,由于朝阳市独特的地理位置和气候条件,使其光热资源十分充足,而降水量稀少,尤其是在春季,日均温增减幅度较大,春旱时段干旱显著,且该时段内温度偏高,导致土壤水分蒸发量严重,大部分地区出现轻度至中度干旱^[20],因此在农业上要做好春旱的防御工作;东部地区潜在蒸散量较低,一般为 134—172 mm,最低值出现在宽甸,为 134 mm,东部地区总体潜在蒸散量变化范围较小。

夏季,各个站点总体潜在蒸散量比春季略高,总体表现为由东南向西北逐渐增加的趋势,并且东部地区在东西方向上的变化较小,而西北部地区变化较大。其中,东部潜在蒸散量较低,变化范围一般为 155—175 mm,最低值出现在宽甸,为 155 mm;西部潜在蒸散量的变化范围一般为 231—388 mm,最高值出现在朝阳,其次是彰武,分别为 397 mm 和 388 mm。在夏季,辽宁西部和北部地区季气候特点为气温偏高,日照偏少,大部分地区降水偏少,降水时空分布极其不均匀,部分地区伏旱较重,因此潜在蒸散量较大,该气象条件对作物生长有利有弊,应改变农业种植结构,合理利用水资源^[21]。

秋季,潜在蒸散量总体呈现由中部地区向四周逐渐递减趋势,并且北部有向彰武地区延伸的趋势,最高值出现在沈阳,为 372 mm,最低值出现在朝阳,为 90 mm。由于辽宁省中部地区在秋冬季节城市热岛效应显著^[22],特别是沈阳、鞍山和本溪等中部地区的城市群是我国传统的重工业基地,使得辽宁省中部地区比四周

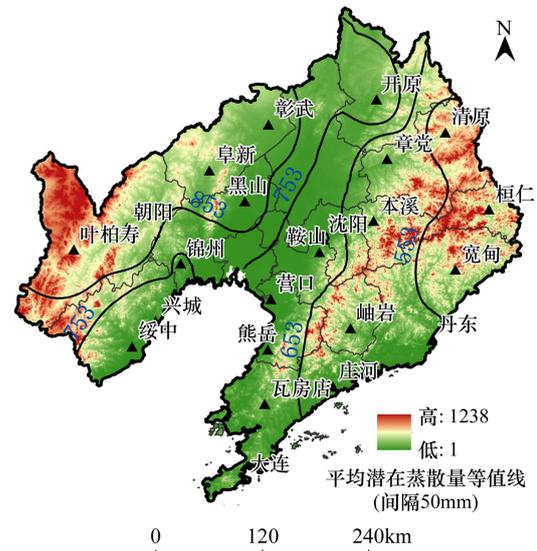


图 2 辽宁省潜在蒸散空间分布

Fig.2 The spatial distribution of ET_0 in Liaoning

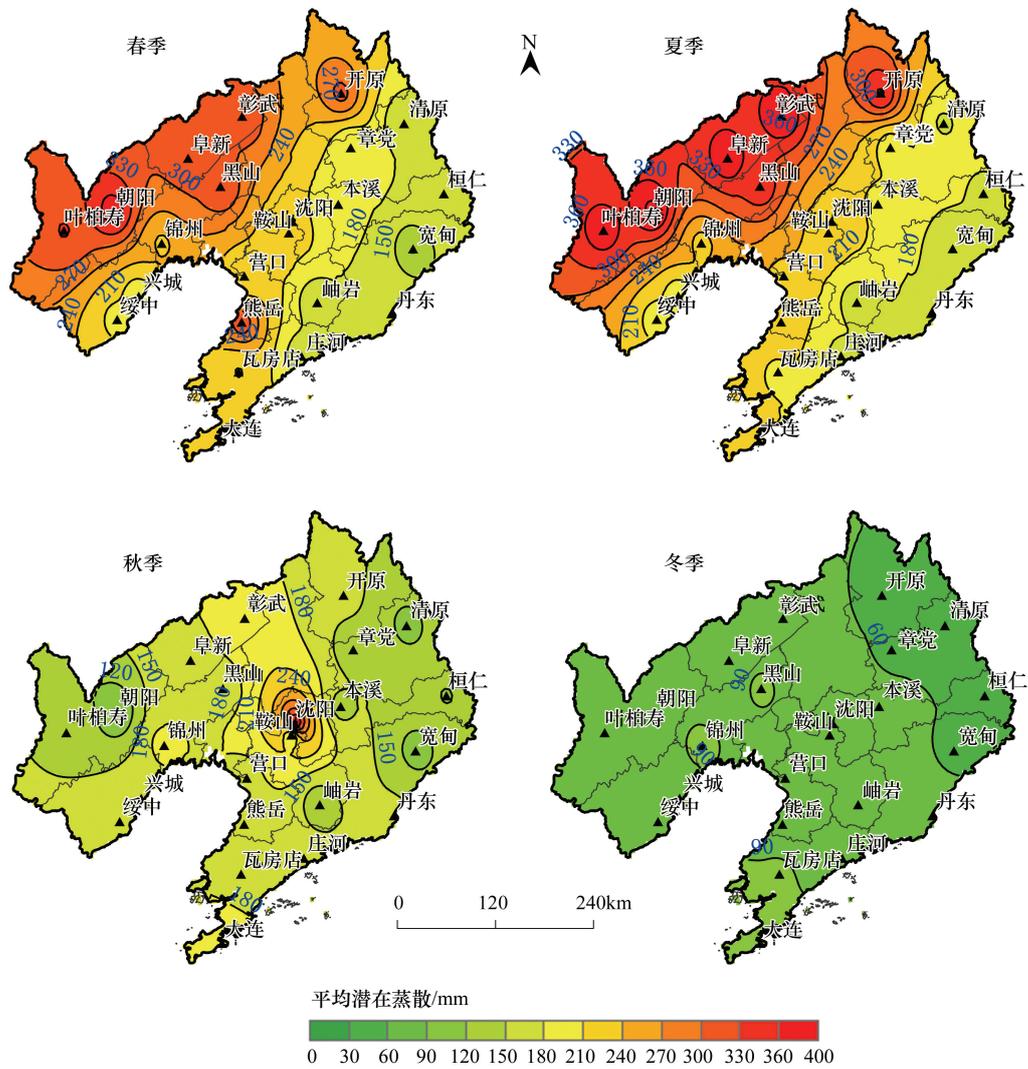


图3 季节平均潜在蒸散空间分布
 Fig.3 The spatial distribution of seasonal ET₀

气温高,因此潜在蒸散量大。

冬季,各个站点整体和其他季节相比其潜在蒸散量最小,总体表现为由东北向西南逐渐增加的趋势,并且整个辽宁省的在东西方向上的变化范围较小,变化范围一般为 47—113 mm,其中,最低值出现在清原,为 47 mm,最高值出现在大连,为 113 mm。冬季辽宁省平均气温具有南高北低、从沿海向内陆逐渐降低的趋势,因此处于南部地区的大连市相比辽宁其他地区冬季温度偏高,且受到海洋气候影响相对湿润,因此潜在蒸散量较大^[23]。

2.3 年际平均潜在蒸散空间分布

1966—2015 年辽宁省潜在蒸散量的空间分布如图 4,总体来看,辽宁省潜在蒸散量存在明显的地区之间的差别,空间分布整体呈现自东向西逐渐递增的规律;从年际变化来看,西北部地区潜在蒸散量大致呈逐年减少趋势变化,东部地区各年代际的变化不大。

20 世纪 60—70 年代潜在蒸散量的平均值在近 50 年中最大,其变化范围一般为 471—1117 mm,年平均为 730 mm,潜在蒸散量高于 1000 mm 的范围较大,随后缩小,直到 20 世纪 70—80 年代高值范围又略有扩大,其变化范围为 445—1067 mm,年平均为 714 mm,但潜在蒸散量仍小于 20 世纪 60—70 年代,与其相比减少了 3.8%;辽宁省西北部地区 20 世纪 90 年代至 21 世纪初的变化范围为 442—1031 mm,年平均 715 mm,在 2005

年之后高于 1000 mm 的范围又开始缩小,21 世纪初潜在蒸散量年平均值与其他各年代际相比最低。潜在蒸散量与所在纬度地区的降水量、温度、日照和风速等因素有直接关系,辽宁省地处中高纬,从潜在蒸散量逐渐减少的趋势可以很好的反映气候变化这一现象,但是由于不同地区对气候变化的响应存在差异,因此,潜在蒸散量的变化程度也各不相同,这与吴霞^[4]等的研究结果较为一致。

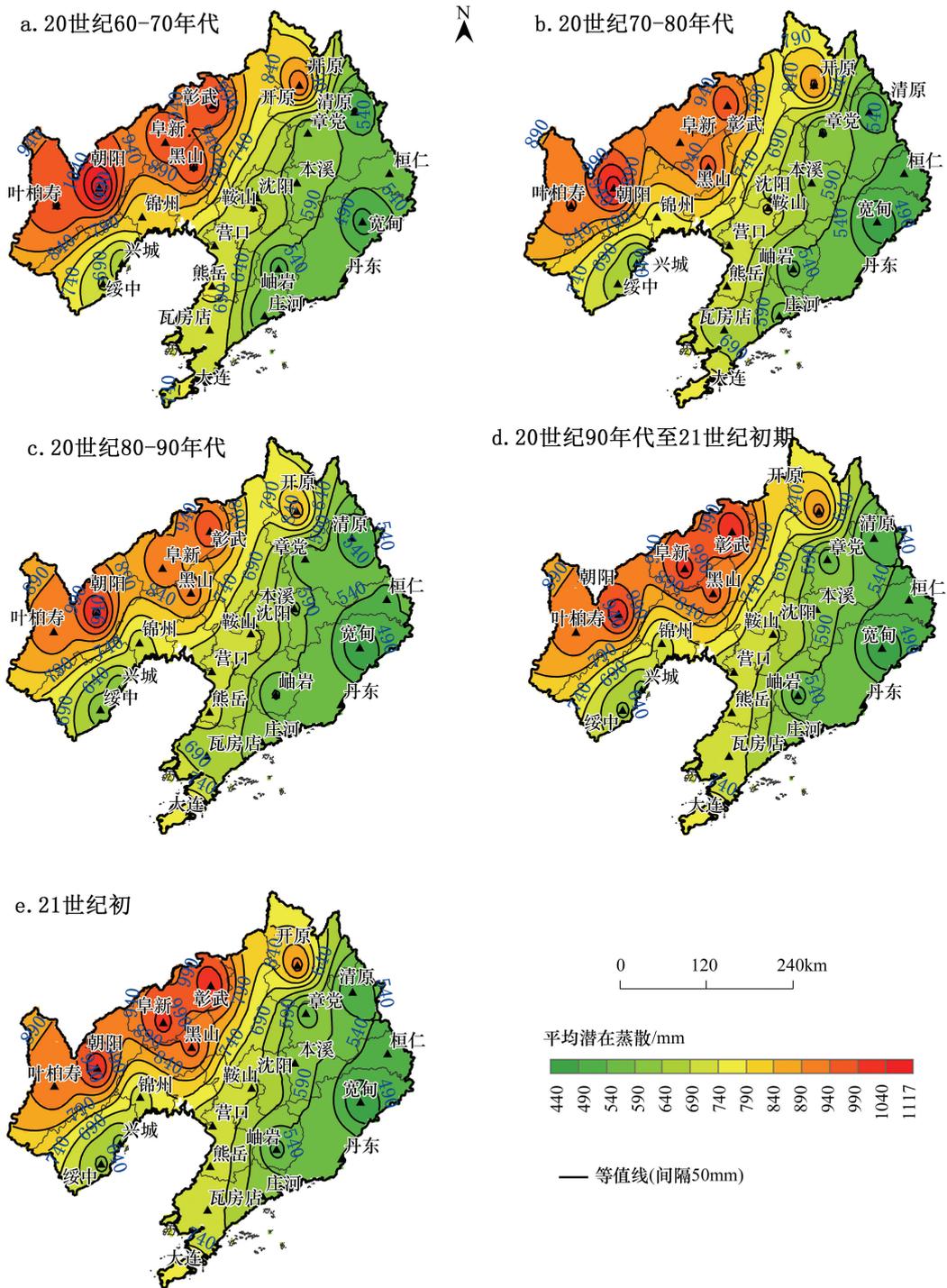


图 4 辽宁省不同年代际平均潜在蒸散空间分布

Fig.4 The spatial distribution of ET₀ in different decades in Liaoning

2.4 辽宁省潜在蒸散量时间演变趋势

1966—2015 年,整体上辽宁省年均潜在蒸散量以 1.43 mm/a 的速率减少,50 年共减少 71.5 mm,相对变化

量为 25.0%(图 5),减少趋势分别通过了 0.01 和 0.05 的信度检验。王琼、吴霞、尹云鹤^[4,13]等的研究结果也得出近 50 年的潜在蒸散量呈下降趋势。

整体看来,近 50 年辽宁省潜在蒸散量的变化趋势基本呈现增减交替变化,变化率为 1.43 mm/a,总体呈现显著性下降趋势变化,变化幅度在 589—759 mm 之间,其中最小值为 589 mm,出现在 2015 年,最大值出现为 759 mm,出现在 1982 年,该年 9 月份曾出现雨量多、强度大的连续阴雨天气过程,因此该年潜在蒸散量相对较大。此后,潜在蒸散量虽呈现增减交替变化,但整体呈下降趋势,潜在蒸散量的时间变化主要反映了气象因素对其的影响,其变化趋势完全是气候自然波动影响的结果。结合图 6,利用 Mann-Kendall 方法对辽宁省近 50 年平均潜在蒸散量进行分析,由 UF 曲线可见,1966—2015 年辽宁省潜在蒸散量呈明显的下降趋势,并且 1993—1999 年和 2007 年以后这种趋势大大超过 0.05 临界线(-1.96),表明辽宁省潜在蒸散量的下降趋势是十分显著的,也有文献表明,中国年平均潜在蒸散量的变化在 90 年代初期也发生了明显的趋势转折^[24],与本文所得结论相一致;根据 UF 和 UB 曲线交点的位置,确定辽宁省蒸散量在 2003 年存在下降趋势突然增大的现象。然而,对 1986—1995 年内潜在蒸散量增大的趋势,M-K 检验并未检测到突变点。

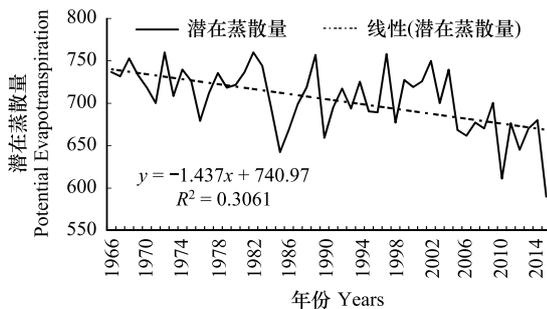


图 5 辽宁省年平均潜在蒸散时间变化趋势

Fig.5 The temporal change trend of ET_0 in Liaoning

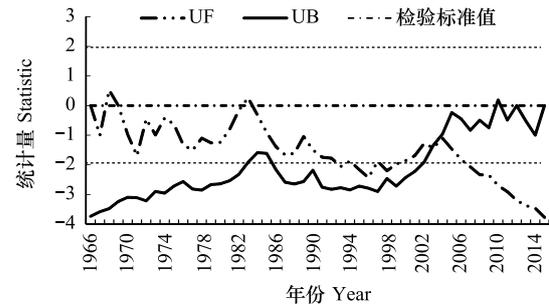


图 6 1966—2015 年年平均潜在蒸散检验结果

Fig.6 The statistical results of ET_0 in Mann-Kendall test from 1966 to 2015

图中 UF 、 UB 为自定义变量其中 UF 为标准正态分布, $UB_k = -UF_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$), $UB_1 = 0$

对近几个年代的潜在蒸散量分别做线性回归(表 1),发现辽宁省范围内除 20 世纪 80—90 年代潜在蒸散量呈上升趋势外,其余各年代均呈下降趋势。通过气象因子排序及偏相关系数检验得到,该下降与上升趋势主要受最高气温、最低气温和风速影响较大,与引言中各位专家研究结果相一致。

表 1 各年代平均蒸散量变化趋势与偏相关系数较高的前三个气象因子

Table 1 The trend of ET_0 and the first three meteorological factors with high partial correlation coefficient in different years

年份 Years	回归系数 Regression coefficients	气象因子排序及偏相关系数 Meteorological factors sorting and partial correlation coefficient
1966—1975	-1.197	1 最高气温(0.646) 2 最低气温(0.565) 3 日照时数(0.455)
1976—1985	-1.643	1 最高气温(0.660) 2 最低气温(0.586) 3 日照时数(0.442)
1986—1995	1.031	1 最高气温(0.645) 2 最低气温(0.567) 3 日照时数(0.462)
1996—2005	-0.780	1 最高气温(0.666) 2 最低气温(0.594) 3 日照时数(0.449)
2006—2015	-4.404	1 最高气温(0.646) 2 最低气温(0.581) 3 日照时数(0.358)

2.5 各站点平均蒸散量时间变化趋势

对辽宁省 23 个气象站点 1966—2015 年平均潜在蒸散量进行线性变化趋势分析,利用方程的斜率 k 表示年平均潜在蒸散量的演变趋势,其空间分布特征如图 7a 所示。在辽宁省 23 个气象站点中,有 21 个站点潜在蒸散量呈减少趋势($k \leq 0$),占研究站点总数的 91.3%,并且 k 值在 -1.84— -0.88 之间的站点分布范围最为广泛;其中, k 值在 -0.88—0.09 之间的站点较为广泛,并且分布特征比较分散;在 0.09—1.05 范围内的站点数最

少,占研究站点总数的 8.7%。

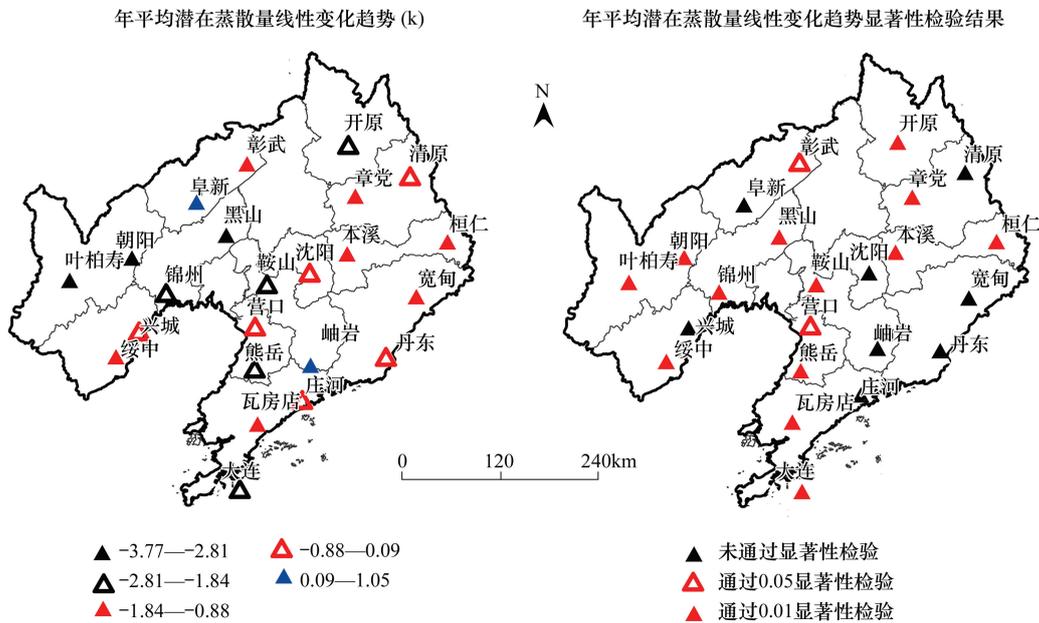


图7 各气象站点平均潜在蒸散线性变化空间分布

Fig.7 The meteorological stations ET_0 linear change of spatial distribution

当 k 值大于 0 时,辽宁省潜在蒸散量在时间变化趋势上的呈递增趋势,小于 0 时,呈递减趋势变化,并且 $|k|$ 越大,递增(或递减)率越高。从整体上看(图 7a),除阜新和岫岩外,整个辽宁省地区 k 值基本都为负值,说明辽宁省大部分区域的潜在蒸散量呈减少趋势,并且 k 值范围在 -3.77 — -2.81 之间的站点主要分布于辽宁西北地区,潜在蒸散量呈减少趋势,其递减率最大,表明辽西北地区潜在蒸散量下降趋势最为明显; k 值在 -2.81 — -1.84 之间的站点比较分散,主要分布于北部、中部和南部; k 值在 -1.84 — 0.88 之间的站点相对较集中,主要分布在北部与东部地区,此范围内的地区中章党 k 值为 -1.48 ,下降趋势在此范围内最为明显, k 值最小出现在宽甸,为 -0.927 ,递减率最小;辽宁省南部和北部部分地区的 k 值在 -0.88 — 0.09 范围内;在 0.09 — 1.05 区间内的研究站点仅为 2 个,分别是阜新和岫岩,潜在蒸散量呈递增趋势变化。同时,对各站点潜在蒸散量的线性变化趋势进行显著性检验,空间分布如图 7b 所示。通过 0.1 显著性检验的站点共 15 个,占研究站点总数的 65.2%;并且,这 15 站点全部通过了 0.05 显著性检验;其次,通过 0.01 显著性检验的站点有 13 个,占研究站点总数的 56.5%;未通过检验的站点有 8 个,占研究站点总数的 34.8%。总得来说,辽宁省年平均潜在蒸散量大体呈递减趋势变化,且递减趋势显著。

2.6 潜在蒸散量变化原因分析

对辽宁省 1966—2015 年各气象站点潜在蒸散量和气象因子年平均值进行偏相关检验分析,各气象因子的偏相关性系数分布有明显的地区差异,潜在蒸散量与各气象因子偏相关系数绝对值大小依次为日最高气温 ($P_{T_{max}}$)、日最低气温 ($P_{T_{min}}$)、日照时数 (P_n)、平均风速 (P_v) 和相对湿度 (P_{RH}),其偏相关系数的辽宁省平均值分别为 0.698、0.627、0.473、0.358 和 -0.246 ,这说明辽宁省潜在蒸散量与日最高气温、日最低气温、日照时数、平均风速呈正相关,与相对湿度呈负相关,这与韦振锋^[25]研究陕西省潜在蒸散量的研究结果相一致,潜在蒸散量与前 5 个因子(日最高气温、日最低气温、日照时数、平均风速和相对湿度)的偏相关系数空间分布见图 8。

在全省范围内, $P_{T_{max}}$ 主要由南向北逐渐递增的趋势分布,除北部零星地区 $P_{T_{max}}$ 较高外,其余地区一般低于 0.8;其中,辽南沿海地区 $P_{T_{max}}$ 较低,变化幅度在 0.54—0.59 之间,说明辽南沿海地区的潜在蒸散量受日最

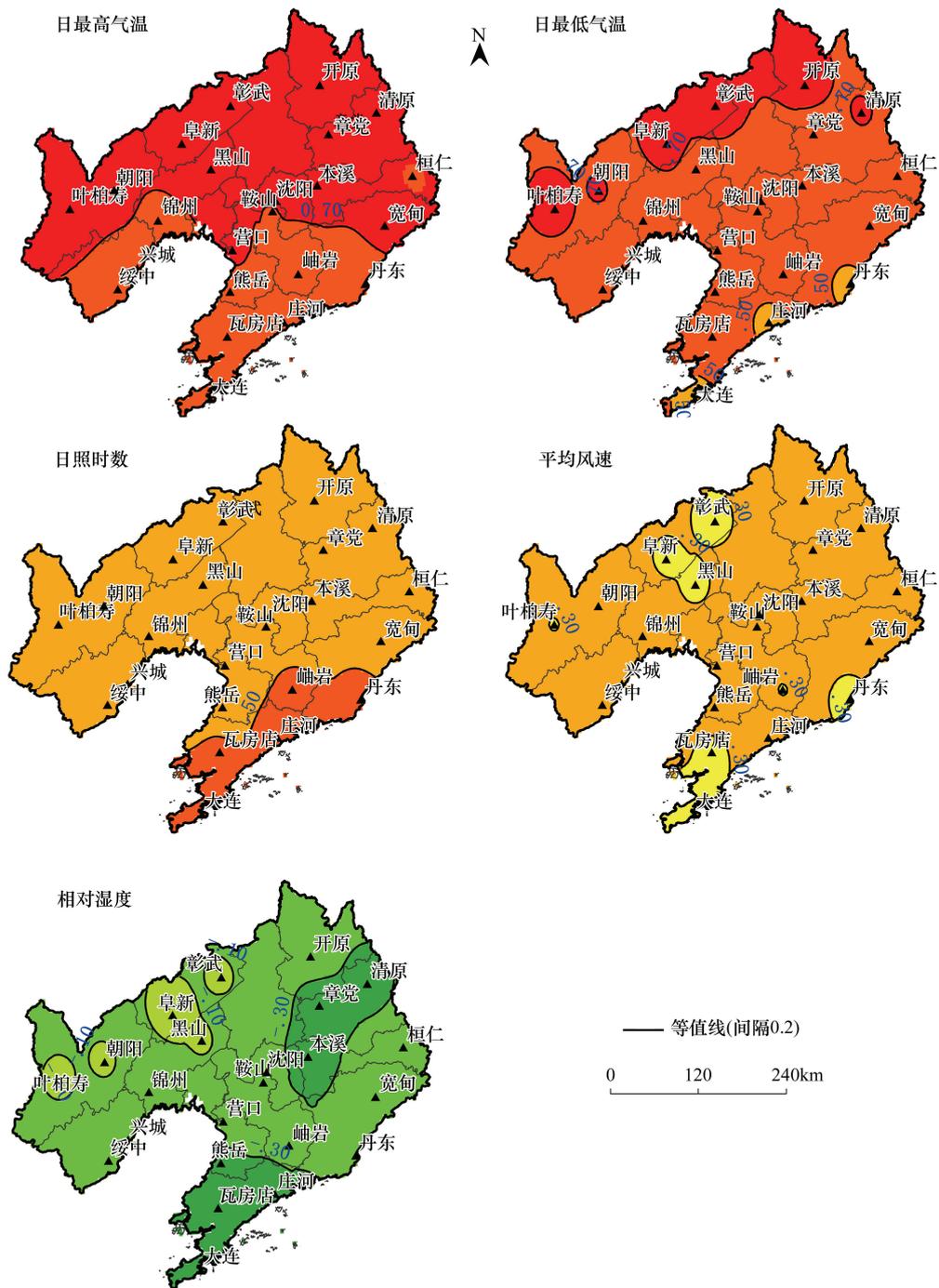


图 8 气象因子的偏相关系数空间分布

Fig.8 Spatial distribution of partial correlation coefficient of meteorological factors

最高气温的变化与内陆地区相比影响较小,并且最高气温对潜在蒸散量的影响在不同站点差异是较大的。

第二因素为日最低气温的偏相关性系数大致呈现由东南向西北逐渐递减的态势分布,变化幅度一般为 0.45—0.76,其中北部与西北部地区 $P_{T_{min}}$ 值相对较高,一般大于 0.74;辽东南地区的丹东、庄河和大连 $P_{T_{min}}$ 相对较低, $P_{T_{min}}$ 分别为 0.45、0.46 和 0.47。

全省范围内, P_n 的空间分布特征与 $P_{T_{max}}$ 和 $P_{T_{min}}$ 相反,主要呈现由东南向西北逐渐递减的态势分布,并且各站点之间 P_n 值总体差距不大,除辽南有零星地区 P_n 较高以外,其余地区 P_n 的变化幅度范围在 0.37—0.47,其中大连地区最高,为 0.58,桓仁最小,为 0.37;辽南地区的潜在蒸散量受日照时数影响大,不仅因为与其他地

区相比纬度较低,当地风速、温度和气溶胶浓度也会间接改变日照时数的增减来影响潜在蒸散量^[26]。

P_v 的空间分布规律与前三个因子有所区别,除辽西北和辽东南零星地区的 P_v 低于 0.3 以外,其余地区变化范围基本在 0.31—0.48 之间,大连最低,为 0.21,最高的是桓仁,为 0.48。

P_{RH} 的空间分布规律与 P_{RH} 相似,不同的是 P_{RH} 在辽宁北部地区向中部延伸出一片狭长的低值区, P_{RH} 整体为负值,说明与潜在蒸散量呈负相关,其中最大值出现在阜新,为 -0.03,最小值出现在大连,为 0.42。

综上分析来看,潜在蒸散量的变化虽然与日最高、最低气温相关性最大,但是不能视为蒸发量是单纯随着温度升降来变化的,而是由多个气象因子综合作用的结果。其中,风速作为动力因子,其值的大小是蒸发过程中水汽输送的主要条件。近 30 年来年东北三省年平均地面风速呈逐渐递减,平均每 10 年减小 0.23 m/s^[27]。辽宁省的地面风速下降导致气流交换速度变慢,蒸发面的水汽不易被带到大气中,最终导致潜在蒸散量减小,也是“蒸发悖论”的主要原因。太阳辐射作为热力因子是潜在蒸散量的能量来源,本文选择日照时数作为辐射的代表量,辽宁省日照时数的减少,导致潜在蒸散量下降,这是由于日照时数减小使得蒸发面接受的辐射能量减少,水分子动能减弱,水汽的扩散能力也就相应减弱,蒸发量下降,从而出现“蒸发悖论”现象,这与 Michael 等^[28]的研究结果相近。相对湿度是指某一地区的湿润或干燥程度,在气候变暖背景下,随着降水减少和气温升高,中国东北地区呈现暖干化趋势^[29],从本文的研究成果来看,相对湿度与潜在蒸散量呈负相关,说明辽宁省暖旱化趋势使得大气变干,促进潜在蒸散量的增大,但是由于前四个主要因子与潜在蒸散量呈正相关,因此抵消了相对湿度对潜在蒸散量负面影响,使其总体呈显著性下降趋势变化。

该研究结果与第一节中谢平等^[14]的结果大体趋于一致,并且与 Thomas^[30]的研究结果相符,他认为中国东北地区潜在蒸散量变化的主导因子为最高温度,而本文研究认为导致辽宁省潜在蒸散量变化的主要气象因子为日最高气温。

分析辽宁省 1966—2015 年前三个主要气象因子(日最高气温、日最低气温和日照时数)的时间变化趋势(图 9),可知 3 个主要因子在近 50 年呈增减交替变化,日最高气温、日最低气温和日照时数距平百分率年平均分别分别为 0.15%、2.10% 和 0.12%,说明近 50 年日最低气温与同期平均状态的偏离程度较大。日最低气温在 20 世纪 60 年代末到 80 世纪变化幅度大且变化相对频繁,20 世纪 90 年代以后变化基本稳定,而日最高气温和日照时数的变化幅度基本相似,3 个因子整体看来在近 50 年是呈减少趋势变化。前面分析可知,日最高气温、日最低气温和日照时数与潜在蒸散量呈正相关关系,因此日最高气温、日最低气温和日照时数的减少趋

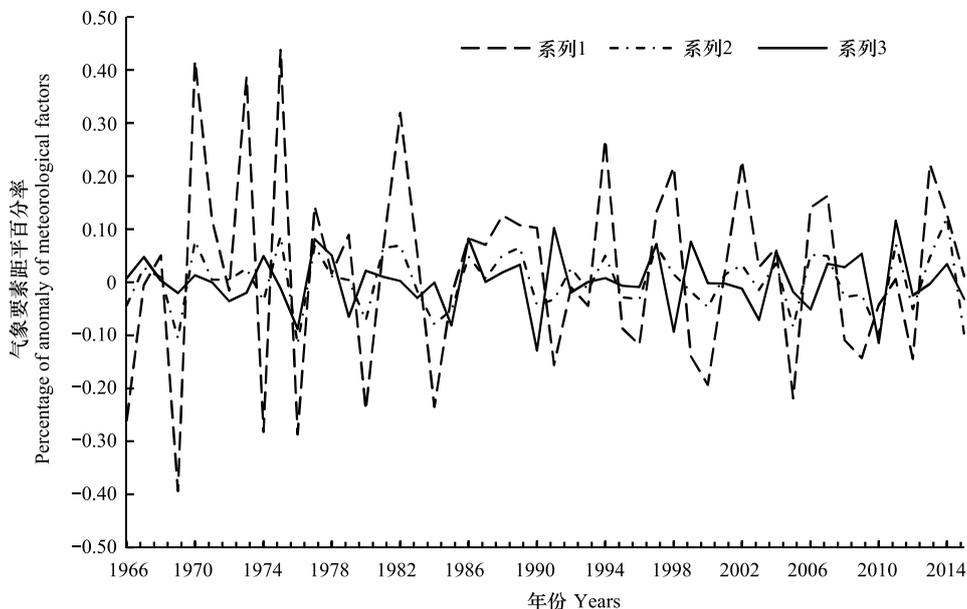


图 9 辽宁省日最高气温、日最低气温和日照时数变化趋势

Fig. 9 The relative change trend of daily maximum temperature, daily minimum temperature and sunshine hour in Liaoning

势共同导致过去 50 年辽宁省潜在蒸散量整体上表现出减少的趋势;而日最高气温与日最低气温在 20 世纪 80 年代中的明显减小趋势可能是引起辽宁省年平均潜在蒸散量在 80 年代存在下降速率突然增大现象的主要原因。

3 结论

(1) 1966—2015 年,辽宁省 23 个站点潜在蒸散量的平均值在 453—1043 mm 之间,表现出由东向西逐渐增大的趋势,且中部地区平均潜在蒸散量在东西方向上的变化较大,东部和西部地区在东西方向上的变化较小,不同地区的潜在蒸散量有所差异。

(2) 全省范围内夏季潜在蒸散量最高、春季和秋季次之、冬季最低;各季节潜在蒸散量在空间分布上有所差异,春季和夏季在空间呈现东向西呈逐渐增加的趋势,秋季则表现为由中部地区向四周逐渐递减,冬季表现为由东北向西南逐渐增加的趋势。近几个年代际,平均潜在蒸散量西北部地区潜在蒸散量大致呈逐年减少趋势变化,东部地区各年代际的变化不大,空间分布整体呈现自东向西逐渐递增的规律。

(3) 从时间上来看,1966—2015 年,辽宁省潜在蒸散量变化趋势基本呈现增减交替变化,总体呈现显著性下降趋势,Mann-Kendall 方法的检验结果显示中国年平均 ET_0 的下降趋势在 1993—1999 年和 2007 年以后存在下降速率突然增大的现象。然而,对 1986—1995 年内潜在蒸散量增大的趋势,M-K 检验并未检测到突变点。

(4) 辽宁省潜在蒸散量的变化主要与日最高气温、日最低气温、日照时数和平均风速呈正相关,和相对湿度呈负相关;并且,日最高气温、日最低气温和日照时数的减少趋势共同导致过去 50 年辽宁省潜在蒸散量整体上表现出减少的趋势。

基于气象数据和 Penman-Monteith (P-M) 方法探究了辽宁省潜在蒸散量时空演变与成因分析,结果表明,辽宁省存在“蒸发悖论”现象,随着进一步分析其“悖论”原因及规律,有助于揭示本地区潜在蒸散量的变化趋势,从而对本地区地气系统之间水分循环的变化产生更加深刻的理解,为气候变化下本地区水资源规划和管理提供科学依据。但是,本研究仅仅探究了潜在蒸散量的时空演变,气候变化下的潜在蒸散量不仅仅体现在水资源的变化,更需要明细辽宁省水热演变的机理与各影响要素的胁迫机制。另外,在潜在蒸散量成因分析上,本文仅仅进行了初步分析,结合下垫面要素等进一步开展潜在蒸散量的机理研究,这还有待后续进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 刘宪锋, 潘耀忠, 张锦水, 林志慧. 1960—2011 年西北五省潜在蒸散的时空变化. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2564-2570.
- [2] Yin Y H, Wu S H, Chen G, Dai E F. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 101(1/2): 19-28.
- [3] 张建军. 黄河中游水沙过程演变及水文非线性分析与模拟[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [4] 吴霞, 王培娟, 霍治国, 白月明. 1961-2015 年中国潜在蒸散时空变化特征与成因. 资源科学, 2017, 39(5): 964-977.
- [5] Golubev V S, Lawrimore J H, Groisman P Y, Speranskaya N A, Zhuravin S A, Menne M J, Peterson T C, Malone R W. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. Geophysical Research Letters, 2001, 28(13): 2665-2668.
- [6] Limjirakan S, Limsakul A. Trends in Thailand pan evaporation from 1970 to 2007. Atmospheric Research, 2012, 108: 122-127.
- [7] Bandyopadhyay A, Bhadra A, Raghuvanshi N S, Singh R. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(5): 508-515.
- [8] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, Li L T, Van Niel T G, Thomas A, Grieser J, Jhajharia D, Himri Y, Mahowald N M, Mescherskaya A V, Kruger A C, Rehman S, Dinpashoh Y. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. Journal of Hydrology, 2012, 416-417: 182-205.
- [9] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87(1): 55-73.

- [10] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation Losing its strength. *Nature*, 1995, 377(6551): 687-688.
- [11] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(9): 1077-1090.
- [12] 陈莉, 方丽娟, 李帅. 东北地区生长季潜在蒸散量的变化特征分析. *灾害学*, 2010, 25(2): 92-96.
- [13] 王琼, 张明军, 潘淑坤, 马雪宁, 李菲, 刘文莉. 长江流域潜在蒸散量时空变化特征. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1292-1302.
- [14] 谢平, 龙怀玉, 张杨珠, 张认连. 近 31 年来云南省潜在蒸散量变化成因. *中国农学通报*, 2017, 33(5): 77-84.
- [15] 张宪冬. 辽宁省农业气象灾害类型及防御措施. *农民致富之友*, 2015(24): 289-289.
- [16] 中国气象局气象数据中心. 中国气象数据网.(2016-01-01)[2017-11-10]. <http://data.cma.cn/>.
- [17] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] 靳国栋, 刘衍聪, 牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较. *长春工业大学学报*, 2003, 24(3): 53-57.
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 (第二版). 北京: 气象出版社, 2007: 37-38.
- [20] 王晓霞, 冯淑霞, 李书君. 2015 年春季辽宁省朝阳市气候特征及农业影响分析. *农业灾害研究*, 2016, 6(1): 28-29, 33-33.
- [21] 刘健, 王晓霞. 辽宁省朝阳市 2013 年夏季气候特征及其影响. *农业灾害研究*, 2015, 5(10): 70-71.
- [22] 李丽光, 金巍, 王宏博, 马雁军. 辽宁中部城市群城市热岛特征及其影响因子分析. *安徽农业科学*, 2009, 37(5): 2113-2116, 2133-2133.
- [23] 赵连伟, 金巍, 张运福, 曲岩. 辽宁冬季气温时空分布特征及其预测概念模型. *气象与环境学报*, 2009, 25(1): 19-22.
- [24] 曹雯, 段春锋, 申双和. 1971—2010 年中国大陆潜在蒸散变化的年代际转折及其成因. *生态学报*, 2015, 35(15): 5085-5094.
- [25] 韦振锋, 陈思源, 黄毅. 1981—2010 年陕西潜在蒸散量时空特征及其对气候因子的响应. *地理科学*, 2015, 35(8): 1033-1041.
- [26] 刘玉英, 韦小丽, 李宇凡. 1961—2012 年吉林省日照时数的变化特征及影响因素. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1367-1377.
- [27] 岳元, 申双和, 金宇, 王琪. “蒸发悖论”在吉林省的表现及成因分析. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 1993-2002.
- [28] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
- [29] 马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析. *气象学报*, 2001, 59(6): 737-746.
- [30] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(4): 381-396.