

1964—2017 年山西省潜在蒸发量时空变化及其影响因素分析

孙从建^{1,2}, 郑振婧¹, 李伟¹, 杨伟¹, 侯慧新¹

(1.山西师范大学 地理科学学院, 山西 临汾 041000;

2.中国科学院 新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要:采用 Penman-Monteith 模型计算出山西省潜在蒸发量,运用小波分析、Mann-Kendall 非参数检验和地统计等方法分析了山西省潜在蒸发量的时空分布特征,并且利用主成分分析法分析了其影响因素。结果表明:(1) 山西省多年平均潜在蒸发量为 1 148.6 mm,存在以 27 a 为主周期和 9 a、45 a 左右为次周期的周期变化;(2) 山西省多年平均潜在蒸发量空间分布特征表现为由中部向南北两边递减,北部地区潜在蒸发量低于南部地区,地势低的地方潜在蒸发量较高;(3) 山西省潜在蒸发量西北部和东南部呈现下降趋势,东北部及西南部呈增加趋势,东北部增加趋势尤为显著;(4) 平均水气压和相对湿度是影响山西省潜在蒸发量的主导因素,潜在蒸发量与平均水气压、相对湿度和海拔高度呈负相关,与温度、风速、日照时数及纬度呈正相关。

关键词:潜在蒸发量; Penman-Monteith 模型; 空间分布; 影响因素; 山西省

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0229-07

Spatial and Temporal Variation Characteristics of Potential Evapotranspiration and Its Impact Factors of Shanxi Province During the Period 1964—2017

SUN Congjian^{1,2}, ZHENG Zhenjing¹, LI Wei¹, YANG Wei¹, HOU Huixin¹

(1.School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China; 2.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: The potential evapotranspiration capacity represents the maximum evaporation capacity of a region and is an important component of the heat balance of the Earth's surface, providing a reference for regional water resources management. We analyzed spatial and temporal variation characteristics of potential evapotranspiration in Shanxi Province with daily observed data of 17 meteorological stations from 1964 to 2017 based on Penman-Monteith model, Wavelet Analysis, Mann-Kendall and ArcGIS interpolation method. And its influencing factors were analyzed by using the principal component analysis. The results showed that the average potential evapotranspiration in Shanxi Province was 1 148.6 mm and presented the fluctuation growth trend; the main period was 27-year while the minor periods was 9-year and 45-year. The spatial variation of the multi-year average potential evapotranspiration in the Shanxi Province showed that the central region was decreasing to the north and south, the northern region had lower potential evapotranspiration than the southern region, and the low-lying region had higher potential evapotranspiration. The potential evapotranspiration of Shanxi Province showed a downward trend in northwest and southeast, while it showed an increasing trend in the northeast and southwest, especially significant in the northeast. The average water vapor pressure and relative humidity are the main factors affecting the potential evapotranspiration of Shanxi Province. Mean annual potential evapotranspiration is positively correlated to the mean temperature, wind speed, sunshine hours and latitude, and negatively correlated with relative humidity, water vapor pressure and altitude.

Keywords: potential evapotranspiration; Penman-Monteith model; spatial distribution; influence factors; Shanxi Province

收稿日期:2018-12-13

修回日期:2018-12-24

资助项目:国家自然科学基金青年基金(41601317);荒漠与绿洲生态国家重点实验室开放基金(G2018-02-06);山西师范大学教学改革创新项目(2017JGXM-33)

第一作者:孙从建(1986—),男,河北沧州人,副教授,博士(后),从事气候变化与水循环研究。E-mail:suncongjian@sina.com

潜在蒸发量是指水分充足条件下蒸散发到空气中的水量,又称可能蒸发量或蒸发能力^[1]。作为水循环过程的一个重要参数,对地表降水及能量辐射的再次分配产生极大的影响^[1-2]。因而,近几十年来有关潜在蒸发量研究也在不断的增多。潜在蒸发量的计算模型有基于气温的 Thornthwaite 方法、基于太阳辐射的 Makkink 方法、Penman-Monteith 模型及蒸发皿蒸发等^[3],但是 Penman-Monteith 模型因其理论基础较为完整且准确性较高,在世界各地被广泛应用,如国外的佛罗里达州南部^[4]、伊朗^[5]、加拿大^[6]、澳大利亚^[7]、朝鲜^[8]等,我国的黄河上游玛曲地区^[9]、天山北坡^[10]、祁连山及河西走廊^[11]、泾惠渠灌区^[12]、三江源区^[13]等均运用 Penman-Monteith 模型计算潜在蒸发量并进行研究。

由于潜在蒸发量的影响因子众多,其变化成因十分复杂,不同地区潜在蒸发量的时空分布特征及其影响因子也不尽相同。刘普幸等^[14]利用甘肃省 27 个气象站点的逐日气象资料,分析了潜在蒸发量的时空变化及影响因子,研究得出甘肃省潜在蒸发量除河西走廊外均呈上升趋势,在空间分布上自东南向西北递减,风速与太阳辐射是其主导因素;刘闻等^[15]研究得出渭河流域关中段潜在蒸发量随海拔的降低而增高,夏季潜在蒸发量的变化趋势与年变化趋势一致,潜在蒸发量与日较差、平均气温、平均风速、日照时数呈正相关,与相对湿度和水汽压呈负相关;朱国锋等^[16]利用横断山区 20 个气象站点的资料分析得出横断山区潜在蒸发量在研究时段呈先减少后上升的趋势,气温、风速及日照时数是影响潜在蒸发量的主导因素。自 20 世纪 80 年代以来,有很多学者做了关于潜在蒸发量的研究^[17],但是目前有关山西省潜在蒸发量及其影响因素的研究较少,对于影响潜在蒸发量的影响因子分析更是较为匮乏。

山西省地处黄土高原东缘,地貌类型复杂^[18],不同地形条件对气象因子影响较大,并且同时存在水资源紧缺等问题^[19],因而研究山西省潜在蒸发量的变化及其影响因素,有助于合理规划水资源,为农业发展提供科学依据。鉴于此,本文基于山西省 17 个气象站点 1964—2017 年逐日气象数据,采用 Penman-Monteith 模型计算出山西省潜在蒸发量,并且运用小波分析、Mann-Kendall 非参数检验和地统计等方法,分析山西省近 53 a 潜在蒸发量时空分布特征,运用主成分分析法分析不同气象因素及地理因素对潜在蒸发量的影响,为山西省水资源永续利用及农业健康发展提供重要的科学依据。

1 研究区概况

本文选取黄土高原东部的山西省作为典型研究区,涉及大同、右玉、河曲、五台、五寨、兴县、原平、太原、离石、介休、榆社、隰县、临汾、长治、侯马、阳城及运城 17 个气象站点(图 1)。山西省位于 $34^{\circ}34'—40^{\circ}43'N$, $110^{\circ}14'—114^{\circ}34'E$ 。平均海拔高度 1 000 m 左右,最低海拔 202 m,最高海拔达 3 059 m。研究区地势东北部高西南部低,地貌类型山地、丘陵、台地、高原及盆地均有分布^[20]。气候属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。年均降水量 400~600 mm,年均温 3~14℃。河流较多,拥有黄河水系和海河水系。土壤类型主要为褐土。植被类型多样,主要以草地、林地和耕地为主^[18]。

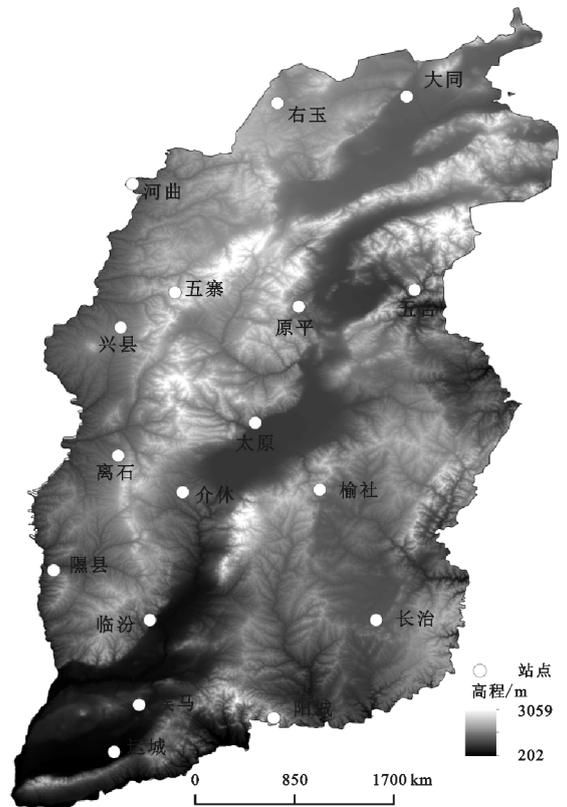


图 1 山西省各气象站点分布

2 数据与方法

2.1 数据来源

选取山西省空间分布均匀、数据长度连续的 17 个气象站点,收集各站点 1964—2017 年的风速(m/s),日均温(℃),日最低气温(℃),日最高气温(℃),日照时数(h),相对湿度(%)及平均水汽压(KPa)数据,计算月、季、年潜在蒸发量,并通过算术平均计算每个站点多年平均潜在蒸发量。此外,还需收集 17 个站点的经纬度

和高程数据。本文季节划分运用气象季节,即春季 3—5 月份,夏季 6—8 月份,秋季 9—11 月份,冬季 12 月份—次年 2 月份。气象数据收录于中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。

2.2 研究方法

2.2.1 Penman-Monteith 模型 采用 1998 年世界粮农组织(FAO)修正后的 Penman-Monteith 模型计算潜在蒸发量。其模型如下:

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

式中: ET_0 表示潜在蒸发量(mm/d); Δ 代表饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C); R_n 是太阳净辐射[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量[MJ/(m²·d)]; γ 为干湿常数(kPa/°C); u_2 表示离地面 2 m 高处的风速(m/s); T 为平均气温(°C); e_s 是饱和水汽压平均值; e_a 代表实际水汽压; $(e_s - e_a)$ 是饱和水汽压差值(kPa)。

2.2.2 时空特征分析方法 潜在蒸发量时间变化主要采用趋势分析及周期分析方法,空间变化主要采用地统计插值。由于 Mann-Kendall 检验不受少数异常值的干扰,样本分布不受一定条件的限制,在水文、气象等非正态分布的数据资料分析中得到了广泛的应用^[21]。通过 Mann-Kendall 统计量 Z 值判断序列数据的变化趋势,当 $Z > 0$ 时表示呈上升趋势, $Z < 0$ 时表示下降趋势, Z 的绝对值越大,说明该序列的变化趋势越显著,当 $|Z| > 1.96$,说明通过 0.05 显著性检验;当 $|Z| > 2.58$,说明通过 0.01 显著性检验。采用小波分析方法(Wavelet Analysis)^[22] 分析潜在蒸发量的周期性变化规律。采用 ArcGIS 地统计模块的反距离权重插值法^[23],分析年潜在蒸发量的空间分布。

2.2.3 主成分分析法 采用主成分分析法对山西省潜在蒸发量的影响因素进行分析。主成分分析是把多个指标化为少数几个综合指标的一种统计分析方法。主要是把给定的一组相关变量通过线性变换转换成另一组不相关的变量,新变量按方差依次递减排列,数学变换过程保持变量的总方差不变,第 1 个变量方差最大,称为第一主成分,第 2 个变量方差其次,且和第 1 个变量不相关,称为第二主成分,依次类推^[24]。降维产生的新变量在不损失原有信息的情况下,使原有变量所代表的信息更集中、更典型地体现出来^[25]。

3 结果与分析

3.1 潜在蒸发量动态变化特征

3.1.1 潜在蒸发量的年际变化 山西省 1964—2017

年平均潜在蒸发量为 1 148.6 mm,年际倾向斜率为 0.3 mm/10 a,总体呈现微弱下降趋势(图 2)。1964—2017 年潜在蒸发量表现为波动变化趋势,其最值分别出现在 1965 年和 2016 年。2016 年潜在蒸发量达到最小值,最小蒸发量为 997.7 mm。1965 年潜在蒸发量达到 1 234.1 mm,为研究时段最大值。1965—1996 年潜在蒸发量处于波动下降趋势,且保持在较低水平。1996—2001 年潜在蒸发量出现大幅度提高,但是 2001—2003 年又出现大幅下降,3 a 间潜在蒸发量下降了 117.94 mm,随后进入小幅波动上升期,2013 年后潜在蒸发量急剧下降。

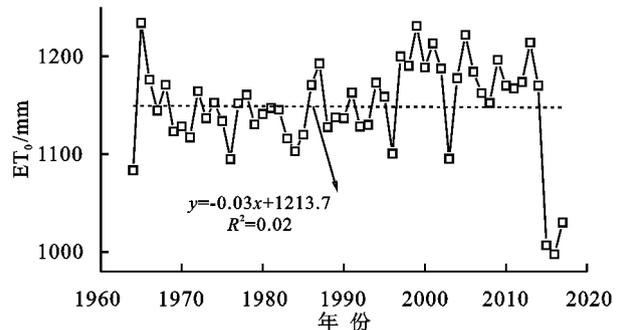


图 2 1964—2017 年山西省年潜在蒸发量的变化

采用小波周期分析法对山西省 53 a 潜在蒸发量序列进行分析(图 3),发现山西省潜在蒸发量存在 27 a 左右的主周期变化以及 9 a, 45 a 左右的次周期变化。在 27 a 左右主周期变化上,有 2 次大的变动,经历了“—,+”相位 1.5 次循环。9 a 及 45 a 左右为小周期变化,其周期分布比较明显,在整个研究时段均有表现。

3.1.2 潜在蒸发量季节变化 山西省潜在蒸发量季节变化趋势如图 4 所示。春季及冬季呈现增长趋势,夏季及秋季呈现下降趋势。山西省春季平均潜在蒸发量为 321.6 mm,占全年潜在蒸发量的 27.9%,1964—2017 年春季潜在蒸发量的年际倾向斜率为 4.2 mm/10 a,呈现显著增长趋势。夏季潜在蒸发量呈现下降趋势,每 10 a 下降 6.4 mm,平均潜在蒸发量为 483.2 mm,占全年潜在蒸发量的 42.1%。秋季平均潜在蒸发量为 242.5 mm,占全年潜在蒸发量的 21.1%,年际倾向斜率为 0.8 mm/10 a,在研究时段小幅下降。冬季潜在蒸发量整体呈现上升趋势,每 10 a 增加 2.4 mm,平均潜在蒸发量为 102.1 mm,占全年潜在蒸发量的 8.9%。

3.2 潜在蒸发量空间变化特征

3.2.1 潜在蒸发量空间分布规律 根据 Penman-Monteith 模型计算出山西省 17 个气象站点 1964—2017 年 53 a 的潜在蒸发量数据进行插值得到研究区潜在蒸发量的空间分布情况(图 5)。山西省多年平

均潜在蒸发量空间分布特征表现为由中部向南北两边递减,北部地区潜在蒸发量低于南部地区。潜在蒸

发量由中部太原盆地地区的 3 759.1 mm 减少至北部五台山地区的 535.4 mm。

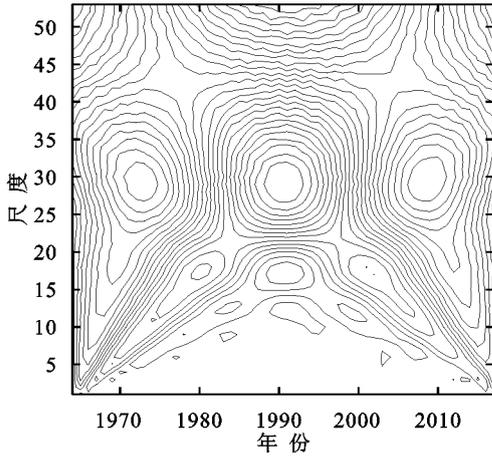


图 3 基于小波分析年潜在蒸发量动态变化

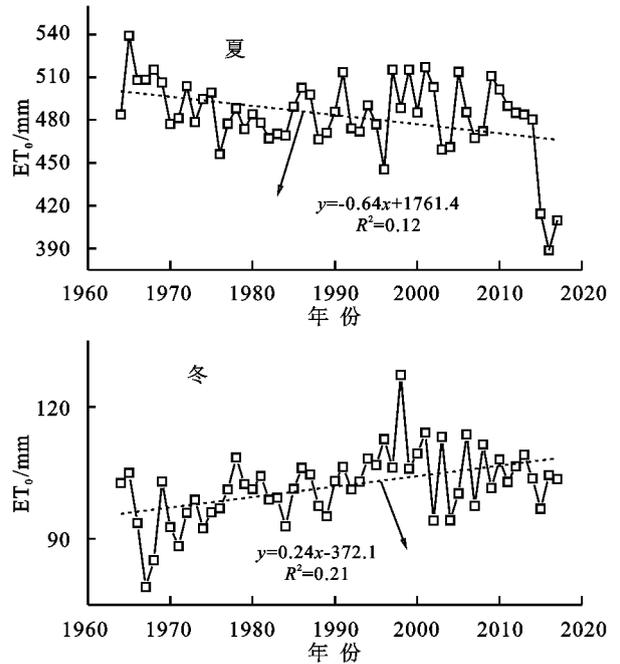
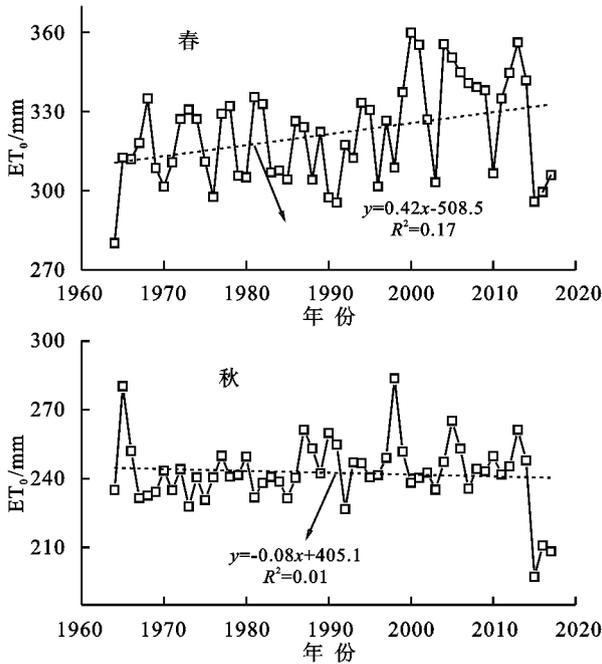
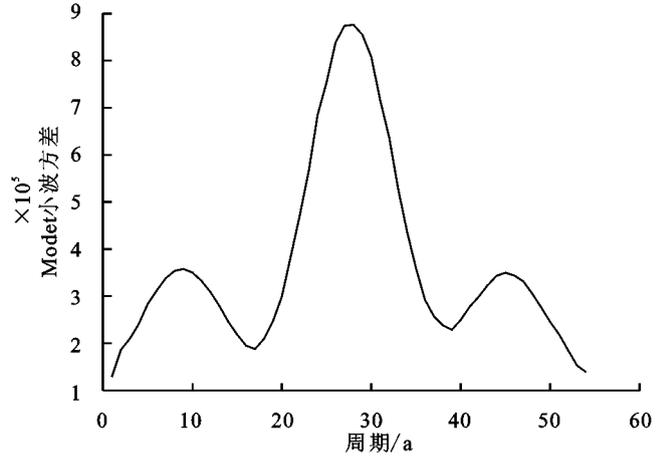


图 4 1964—2017 年山西省不同季节潜在蒸发量变化

3.2.2 潜在蒸发量空间变化趋势分析 通过统计每一个气象站 1964—2017 年潜在蒸发量 Mann-Kendall 统计量 Z 值,进一步分析山西省潜在蒸发量的变化趋势,基于 ArcGIS 绘制出潜在蒸发量 Z 值的空间分布图(图 6)。

山西省潜在蒸发量的 Mann-Kendall Z 值呈现出明显的地域差异,西北部和东南部潜在蒸发量呈现下降趋势,东北部及西南部呈增加趋势,东北部增加趋势尤为显著,通过了 0.01 显著性检验。在东北部 7 个站点中,有 5 个站点的潜在蒸发量表现为显著增加趋势,分别以 2.89,3.56,3.37,3.04,5.73 mm/a 的速率在增加。

不同季节研究区潜在蒸发量变化也存在显著差异

(图 7),春季大部分地区潜在蒸发量呈增加趋势,北部地区呈现显著增加趋势,有 5 个站点通过了显著性检验 ($|Z| > 2.58$)。夏季潜在蒸发量变化大部分呈现减少趋势,有 9 个站点通过了 0.05 显著性检验,其中站点榆社通过了 0.01 显著性检验。东北部地区出现增长趋势,并且通过了显著性检验 ($|Z| > 1.96$)。秋季除了站点河曲与大同呈现减少趋势外,北部大部分地区呈现增加趋势,并且有 4 个站点通过了 0.05 显著性检验,南部大部分地区呈现减少趋势,但是并未通过 0.05 显著性检验。冬季整体呈现增加趋势,有 7 个站点通过了显著性检验 ($|Z| > 2.58$)。4 个季节总体都表现为站点五台地区呈现显著增加趋势,分别以 5.86, 5.13, 5.69, 6.89 mm/a 的速率增加。

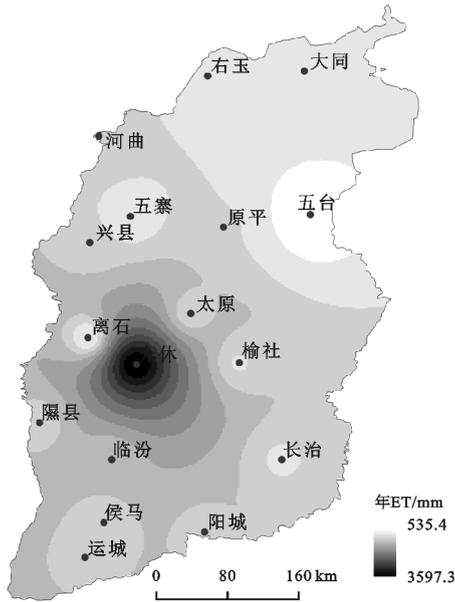


图 5 山西省年潜在蒸发量空间分布

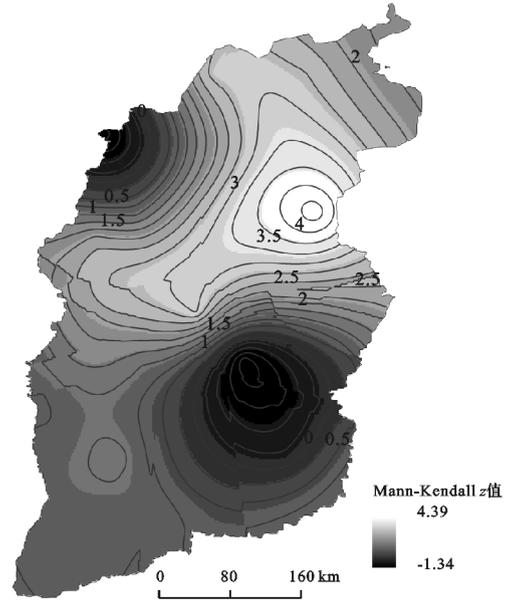


图 6 潜在蒸发量 Mann-Kendall Z 值的空间分布

3.3 潜在蒸发量变化的成因分析

影响潜在蒸发量的因素众多,涉及到气象因子、地理因子等^[13]。本文在利用 Penman-Monteith 模型计算潜在蒸发量时用到的气象因子有平均气温(T_{ave})、最高气温(T_{max})、最低气温(T_{min})、相对湿度(RH)、平均水气压(E_a)、风速(W)、日照时数(SH),地理因子包括纬度(LAT)和海拔高度(H)。分析以上因子对山西省年潜在蒸发量的影响程度。主成分识别是以各因子作为原变量,通过计算变量方

差和协方差矩阵的特征值,将多个变量通过降维转化为少数几个综合变量,即对影响因子信息进行集中和提取,从中识别出起主导作用的成分^[26]。表 1 为各影响因子解释的总方差,从中可以看出前 4 个主成分的累计贡献率达 89.03%,说明前 4 个主成分已经将 9 个因子所涵盖的信息集中的体现了出来,选用前 4 个主成分代替原先的潜在蒸发量的影响因子。在前 4 个主成分中,第 1 主成分所涵盖的信息最多,达到了 33.56%。

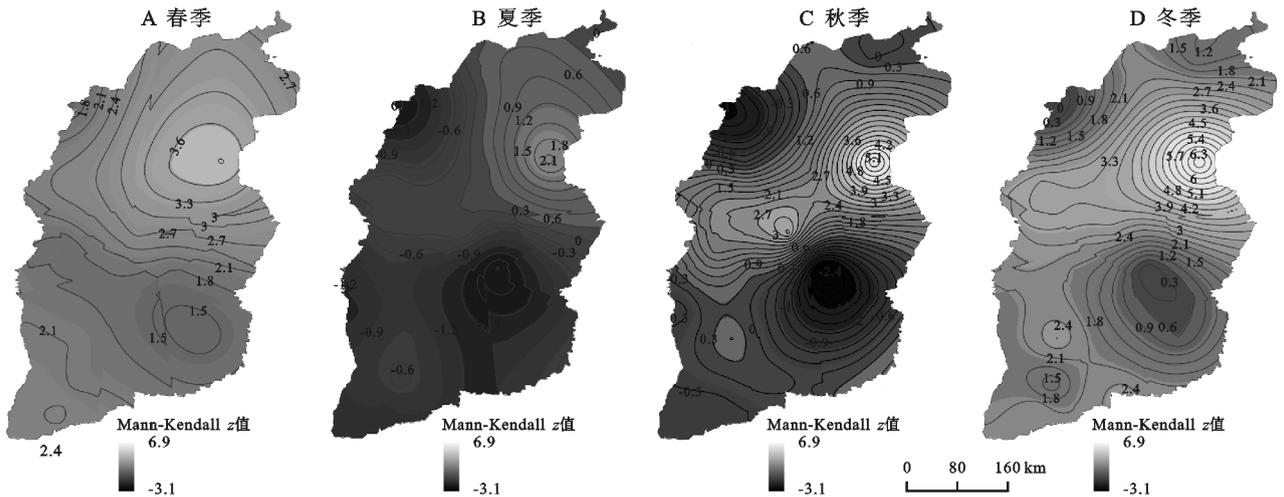


图 7 1964—2017 年山西省不同季节潜在蒸发量 Z 值的空间变化

表 2 为通过最大方差法得到旋转后的因子载荷矩阵。因子载荷矩阵中绝对值的大小决定了其载荷量的多少,表明对该主成分的影响高低程度^[27]。从表中可以看出,相对湿度和平均水气压在第 1 主成分上有较大载荷,载荷分别为 0.28,0.29,并且这两个因子与第 1 主成分呈负相关。第 2 主成分有较大载荷的因子分别是平均气温、最高气温和最低气温,这 3 个因子

与第 2 主成分呈正相关。纬度在第 3 主成分上载荷较大,并且呈正相关。第 4 主成分上载荷较大的是风速、日照时数和海拔高度,风速和日照时数呈正相关,海拔高度呈负相关。本文通过对潜在蒸发和影响因素做主成分分析,结果表明:各因子对潜在蒸发量的影响排序依次为平均水气压>相对湿度>最高气温>最低气温>平均温度>纬度>海拔高度>风速>日照时数。

表 1 山西省潜在蒸发量的各主成分及其特征值和贡献率

主成分	1	2	3	4	5	6	7	8	9
特征值	3.02	2.26	1.55	1.18	0.43	0.30	0.14	0.10	0.02
贡献率	33.56	25.13	17.26	13.09	4.76	3.38	1.52	1.15	0.16
累计贡献率	33.56	58.69	75.95	89.03	93.79	97.17	98.69	99.84	100

表 2 山西省潜在蒸发量的因子载荷矩阵

因子	T_{ave}	T_{max}	T_{min}	RH	E_a	W	SH	H	LAT
1	0.11	0.23	-0.17	-0.28	-0.29	0.15	0.21	0.09	0.05
2	0.39	0.27	0.33	0.03	0.14	-0.13	-0.03	0.14	0.23
3	-0.17	-0.20	-0.07	0.19	0.14	0.32	0.19	0.39	0.48
4	0.16	-0.01	0.28	0.22	0.07	0.47	0.46	-0.50	-0.10

4 讨论

利用日尺度气象资料通过 Penman-Monteith 模型计算出潜在蒸发量可以对地区水资源合理利用、农业生产发展提供科学依据。本文利用山西省 17 个气象站点逐日气象资料,分析了山西省潜在蒸发量的时空分布特征及其变化趋势,结果表明:山西省潜在蒸发量呈现波动变化,总体表现为年潜在蒸发量呈上升趋势,年均潜在蒸发量的最大最小值分别为(1 234, 997 mm)。对比山西省与邻近地区的潜在蒸发量分布特征可知(表 3),研究区北部的内蒙古地区^[28]、研究区南部的河南地区^[29]以及研究区东部的河北地区^[30]潜在蒸发量在近 50 a 都呈下降趋势,其年均潜在蒸发量的最大最小值分别为(834, 790 mm), (1 247, 418 mm), (1 488, 1 190 mm)。研究者通过对黄土高原西部甘肃省^[31]潜在蒸发量进行研究,得出黄土高原西部地区潜在蒸发量近 50 a 整体表现为上升趋势。相同的潜在蒸发量变化趋势(上升)在黄土高原中南部的陕西地区^[32]也得到验证,其年均潜在蒸发量的最大最小值分别为(1 153, 895 mm)。黄土高原西部及中南部潜在蒸发量的变化趋势与本文研究结论类似。

一些研究者通过对于影响区域潜在蒸发量的驱动因素的分析结果显示^[12-13, 32-34]:气温、风速、日照时数、相对湿度、饱和水汽压差和云量等诸多气象要素是区域潜在蒸发量变化的控制因素,但不同区域不同的控制因素影响权重不尽相同^[1, 14, 16, 33]。山西省潜在蒸发量总体表现为在五台地区较低,在太原盆地地区较高,这一现象主要是受了海拔高度的影响,五台地区有“华北屋脊”之称,海拔高度达 2 208.3 m,而太原盆地地区地势较低。潜在蒸发量的变化除了受气象因子、地理因素影响外还受其他因素的间接影响,例如人类的活动^[32]。因此,在今后还需深入研究山

西省潜在蒸发量变化的原因,更好的为水资源管理、利用及农业发展提供科学依据。

表 3 研究区邻近区域潜在蒸发量变化趋势及其最值

研究区与时间	作者	变化趋势	年均潜在蒸发量最大值	年均潜在蒸发量最小值
内蒙古地区(1961—2008)	白美兰等 ^[28]	下降	834	790
黄土高原西部(1970—2007)	王素萍等 ^[31]	上升	1243	733
陕西地区(1960—2013)	Ning 等 ^[32]	上升	1153	895
河南地区(1971—2010)	姬兴杰等 ^[29]	下降	1247	418
河北地区(1956—2007)	张可慧等 ^[30]	下降	1488	1190

5 结论

(1) 山西省多年潜在蒸发量在不断上升,其平均值为 1 148.6 mm。春季、秋季和冬季潜在蒸发量分别出现不同程度的上升,春季上升幅度最大,气候倾向率为 4.2 mm/10 a。夏季潜在蒸发量在不断下降。山西省潜在蒸发量存在 27 a 左右的主周期变化以及 9 a, 45 a 左右的次周期变化特征。

(2) 山西省潜在蒸发量空间分布特征由中部向南北两边递减,整体体现为地势较低的地方潜在蒸发量高。

(3) 山西省西北部和东南部潜在蒸发量呈现下降趋势,东北部及西南部呈增加趋势,东北部增加趋势尤为显著,通过了 0.01 显著性检验。春季、秋季及冬季变化趋势与年变化趋势一致,夏季大部分地区呈现减少趋势。

(4) 平均水气压和相对湿度是影响山西省潜在蒸发量的主导因素。潜在蒸发量与平均水气压、相对湿度和海拔高度呈负相关,与温度、风速、日照时数及纬度呈正相关。

参考文献:

- [1] 韩盟伟,赵广举,穆兴民,等.黄土高原 1959—2015 年潜在蒸发量的时空变化[J].干旱区地理:汉文版,2017,40

- (5):997-1004.
- [2] 巩骏骥.黄河三角洲蒸散发变化及影响因素研究[D].济南:山东师范大学,2015.
- [3] 徐宗学,王光谦,方红卫,等.水文模型[M].北京:科学出版社,2009.
- [4] Abtew W, Obeysekera J, Iricanin N. Pan evaporation and potential evapotranspiration trends in South Florida [J]. *Hydrological Processes*, 2015,25(6):958-969.
- [5] Valipour M. Analysis of potential evapotranspiration using limited weather data[J]. *Applied Water Science*, 2017,7(1):1-11.
- [6] Burn D H, Hesch N M. Trends in evaporation for the Canadian Prairies[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,336(1):61-73.
- [7] Kirono D G C, Jones R N, Cleugh H A. Pan-evaporation measurements and Morton-point potential evaporation estimates in Australia; are their trends the same[J]. *International Journal of Climatology*, 2009,29(5):711-718.
- [8] Song Y, Ryu Y, Jeon S. Interannual variability of regional evapotranspiration under precipitation extremes: A case study of the Youngsan River basin in Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,519(3):3531-3540.
- [9] 宁和平,李国军,王建兵.黄河上游玛曲地区近40 a 蒸发量变化特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011,25(8):113-117.
- [10] 刘琳,张正勇,颜巧.天山北坡潜在蒸发量时空分布特征[J]. *水土保持研究*, 2015,22(5):306-311.
- [11] 贾文雄,何元庆,王旭峰,等.祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化[J]. *水科学进展*, 2009,20(2):159-167.
- [12] 粟晓玲,宋悦,牛纪苹,等.泾惠渠灌区潜在蒸散发量的敏感性及其变化成因[J]. *自然资源学报*, 2015,30(1):115-123.
- [13] 周秉荣,李凤霞,肖宏斌,等.三江源区潜在蒸散发时空分异特征及气候归因[J]. *自然资源学报*, 2014,29(12):2068-2077.
- [14] 刘普幸,卓玛兰草.甘肃省1960—2008年潜在蒸散发量时空变化及其影响因子[J]. *自然资源学报*, 2012,27(9):1561-1571.
- [15] 刘闻,曹明明,邱海军,等.渭河流域关中段潜在蒸发量时空变化特征[J]. *地理科学*, 2014,34(9):1145-1152.
- [16] 朱国锋,何元庆,蒲焘,等.1960—2009年横断山区潜在蒸发量时空变化[J]. *地理学报*, 2011,66(7):905-916.
- [17] 唐登银,程维新,洪嘉琏.我国蒸发研究的概况与展望[J]. *地理研究*, 1984,3(3):84-97.
- [18] 程朋.基于遥感技术的山西省植被覆盖变化及其驱动机制[D].太原:太原理工大学,2016.
- [19] 唐丽霞,张志强,王新杰,等.晋西黄土高原丘陵沟壑区清水河流域径流对土地利用与气候变化的响应[J]. *植物生态学报*, 2010,34(7):800-810.
- [20] 张先平,李志琴,王孟本,等.山西省草地景观的数量分类与排序[J]. *生态学报*, 2014,34(12):3386-3395.
- [21] 张东艳,吴运卿,李妮,等.基于 Mann-Kendall 检验的尼洋河流域水文变量演变趋势分析[J]. *中国农村水利水电*, 2017,4(12):86-89.
- [22] 徐克兵.雅鲁藏布江干流河川径流变化的小波分析[J]. *东北水利水电*, 2014,32(1):38-40.
- [23] 贾悦,崔宁博,魏新平,等.基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J]. *农业工程学报*, 2016,32(6):130-138.
- [24] 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.
- [25] 李兴国,张莉莉.“降维”技术在多变量综合评价中的应用:基于 TOPSIS 和 GRA 的实证检验[J]. *徐州工程学院学报:社会科学版*, 2016,31(6):47-51.
- [26] 刘永志.主成分分析和聚类在科学技术数据分析中的应用[D].长春:吉林大学,2016.
- [27] 张连金,赖光辉,孙长忠,等.北京九龙山土壤质量综合评价[J]. *森林与环境学报*, 2016,36(1):22-29.
- [28] 白美兰,郝润全,侯琼,等.内蒙古典型草原区地表干湿状况变化趋势及影响因素分析[J]. *中国农业气象*, 2011,32(2):208-213.
- [29] 姬兴杰,朱业玉,顾万龙.河南省参考作物蒸散发量变化特征及其气候影响分析[J]. *中国农业气象*, 2013,34(1):14-22.
- [30] 张可慧,刘剑锋,刘芳圆,等.河北省潜在蒸发量计算与变化趋势分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2010,26(6):75-78.
- [31] 王素萍,张存杰,韩永翔.甘肃省不同气候区蒸发量变化特征及其影响因子研究[J]. *中国沙漠*, 2010,30(3):675-680.
- [32] Ning T, Li Z, Liu W, et al. Evolution of potential evapotranspiration in the northern Loess Plateau of China; recent trends and climatic drivers[J]. *International Journal of Climatology*, 2016,36(4):135-144.
- [33] Li C, Wu P, Li X, et al. Spatial and temporal evolution of climatic factors and its impacts on potential evapotranspiration in Loess Plateau of Northern Shaanxi, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,589(2):165-172.
- [34] 张明军,李瑞雪,贾文雄,等.中国天山山区潜在蒸发量的时空变化[J]. *地理学报*, 2009,64(7):798-806.