

1955—2015 年陕西省潜在蒸散量时空变化特征及成因

安彬, 肖薇薇

(1. 安康学院 旅游与资源环境学院, 陕西 安康 725000;

2. 安康市汉江水资源保护与利用工程技术研究中心, 陕西 安康 725000)

摘 要:为深入认识气候变化下陕西潜在蒸散量(ET_0)年际和年内的变化特征及主要影响因素,根据陕西省 20 个气象站点逐日气象数据,利用 Penman-Monteith 公式计算了 1955—2015 年全省潜在蒸散量,运用累积距平、Mann-Kendall 突变检测、最优分割、反距离加权插值等分析方法,分析了年均及四季潜在蒸散量时空变化特征;并采用偏相关、多元回归模型对影响潜在蒸散量的主导气象要素进行了定量研究。结果表明:(1) 1955—2015 年,陕西省年 ET_0 呈微弱上升趋势,变化率为 1.03 mm/10 a,分时段 ET_0 呈“倒 S”型变化。(2) 从季节看,春、夏、秋、冬季平均 ET_0 变化率分别为 3.72, 0.12, 0.36, -2.95 mm/10 a。(3) 研究区内年及季节平均 ET_0 的空间分布存在明显地带性规律特征。(4) 平均气温是全年及春、秋、冬季 ET_0 变化的主导因素,日照是夏季 ET_0 变化的主导因素。这些结果表明陕西省潜在蒸散量的时空变化具有阶段性、地带性,其影响因素具有季节性。研究可为气候变化下陕西省水资源科学配置以及影响评估提供依据。

关键词:潜在蒸散量; Penman-Monteith 方程; 时空变化; 成因分析; 陕西省

中图分类号: P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0146-06

Spatial and Temporal Variations of Potential Evapotranspiration in Shaanxi Province and the Quantification of the Causes from 1955 to 2015

AN Bin, XIAO Weiwei

(1. School of Tourism & Environment, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China; 2. Engineering Technology Research Center for Water Resource Protection and Utilization of Hanjiang River, Ankang, Shaanxi 725000, China)

Abstract: In order to have a thorough recognition of the variation characteristics and influencing factors of potential evapotranspiration (ET_0) in Shaanxi Province under the climate change. Based on 20 meteorological sites of daily weather data from 1955 to 2015 in Shaanxi Province, the Penman-Monteith (P-M) is utilized to calculate the potential evapotranspiration (ET_0). The spatial and temporal variations of annual and seasons ET_0 are analyzed by using cumulative distance, Mann-Kendall mutation detection, the optimal partition method, inverse distance weighted interpolation (IDW) and other mathematical methods. The dominant meteorological elements influencing ET_0 are quantitatively studied by using partial correlation and multiple regression models. The results showed that the annual ET_0 of Shaanxi Province from 1955 to 2015 presented slight rising trend with the rate of 1.03 mm/decade. ET_0 changed as the inverted S-shape over the periods. The average ET_0 rates in spring, summer, autumn and winter were 3.72 mm/decade, 0.12 mm/decade, 0.36 mm/decade and -2.95 mm/decade. The spatial distribution of annual and seasonal ET_0 in the study area was significant variation pattern of latitudinal direction zonality. The main impacting factor was average temperature in spring, autumn and winter, but was sunshine duration in summer. The above results indicated that the ET_0 in Shaanxi Province had the characteristics of stage and zonality, influencing factors had the seasonal characteristics. The results would provide valuable information for water resources optimal allocation and assessment in Shaanxi Province.

Keywords: potential evapotranspiration; Penman-Monteith equation; spatial and temporal variations; quantification of the causes; Shaanxi Province

潜在蒸散量(Potential Evapotranspiration, ET_0),它表示在一定气象条件下水分供应不受限制时,某固定下垫面可能达到的最大蒸发蒸腾量,是实际蒸散量的理论上限^[1]。 ET_0 作为地表热量平衡和水分循环的重要组成部分,是评价气候干湿程度、农业水资源利用和计算作物生产潜力的关键指标^[2-4],对区域内水资源配置、水循环模拟等具有重要意义。目前,计算潜在蒸散量的公式比较多,如谢良尼诺夫法、桑斯威特法、丘克法、彭曼综合法、布德柯综合法、Thornthwaite、Hargreaves 公式、高桥浩一郎陆面蒸发经验模型等^[5];其中应用最为广泛的是联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith(P-M)方程,该模型是目前公认的计算潜在蒸散量精度较高的方法之一^[6]。不少学者依据此方法对不同区域的 ET_0 时空分布特征进行了探索。众多研究表明,潜在蒸散量的空间变化具有异质性,包括印度^[7]、美国^[8]、伊朗^[9]、中国^[10]等全球大部分国家的 ET_0 整体均呈下降趋势。还有众多学者对中国不同流域^[4,11-12]、行政区^[13-14]、地理分区^[15-16]等尺度的 ET_0 时空分布特征进行了研究。陕西省从南至北分别是秦巴山地、关中平原和黄土高原,跨越3个气候带,作为生态环境脆弱区及气候变化敏感区之一,自20世纪中期以来该地区年降水波动下降、增温显著,呈现暖干化趋势^[17]。基于这种大背景下,涉及全省范围 ET_0 时空变化规律的研究相对较少。本文采用 P-M 模型、Mann-Kendall 突变检测、最优分割等方法系统分析 1955—2015 年陕西省 ET_0 的时空变化特征,并采用偏相关、多元回归模型对影响潜在蒸散量的主导气象要素进行定量研究,旨在为评价陕西省水资源的开发与利用状况,同时为促进区域社会经济可持续发展提供科学决策依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

陕西省地处中国西北内陆地区,位于 $105^{\circ}29'—111^{\circ}15'E, 31^{\circ}42'—39^{\circ}35'N$,从南至北分别是秦巴山地落叶阔叶和常绿阔叶混交林生态区、渭河谷地农业生态区、黄土高原农牧生态区和长城沿线风沙草原生态区,是全球气候变化响应敏感地区之一。全省气候差异大,由南向北依次为北亚热带、暖温带和温带,整体属大陆季风性气候。由于南北延伸很长,到 800 km 以上,跨纬度多,而引起境内南北间气候的明显差异,温度和降水基本上是由南向北逐渐降低,年均温在 $7\sim 16^{\circ}C$,多年平均降水量 656.7 mm,多年平均潜在蒸散量 914.93

mm,水资源总量为 444.99 亿 m^3 。陕南地区是我国重要的水源涵养与生物多样性保育生态区,陕北则是全国水土流失最严重的区域之一。

1.2 数据来源

本文所选择的数据源是分布较均匀、气象资料时间序列连续性强榆林、西安、石泉等 20 个国家基准站 1955—2015 年的逐日平均气温、最高温度、最低温度、相对湿度、平均风速和日照时数资料,资料均来自于中国气象科学数据共享服务平台(<http://www.data.cma.cn>),气象站点的分布见图 1。利用反距离权重插值法(IDW)对个别站点缺测的气象资料进行处理^[18],使得 20 个站点的资料具有完整性。年统计按照自然年,季节统计的标准:3—5 月为春季,6—8 月夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。

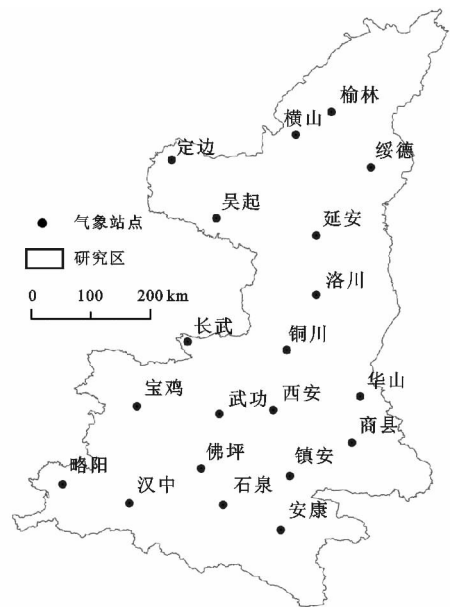


图1 陕西省气象站点空间分布

1.3 研究方法

1.3.1 潜在蒸散量(ET_0)计算 本文采用 FAO 推荐修正的标准 Penman-Monteith(P-M)方程计算逐日潜在蒸散量 ET_0 ^[6],其公式为:

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

式中: ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d); Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/ $^{\circ}C$); R_n 是作物表面的净辐射量(MJ/ m^2); G 是土壤热通量[MJ/($m^2 \cdot d$)]; γ 为湿度计常数(kPa/ $^{\circ}C$); t 为平均气温($^{\circ}C$); U_2 为 2 m 高的风速(m/s); e_a 是饱和水汽压(kPa); e_d 是实测水汽压(kPa)。

1.3.2 分析方法 将各站点逐日气象数据分别代入模型式中,计算出逐日 ET_0 ,采用数理统计方法,分析研究区的气候 ET_0 的季节、年变化;气候倾斜率和气候变

率均采用韩玮等^[19]所用方法;突变检测选择应用最广泛的非参数统计检验方法 Mann-Kendall 法^[16];应用 Fisher 法最优分割法^[20]对有序的 ET_0 样本进行聚类分级;采用 ET_0 数据与各气象要素进行偏相关、多元回归模型^[21]分析影响 ET_0 的主要气象要素。以上计算与统计工作采用 ArcGIS 10.0 以及 IBM SPSS Statistics 22 中完成,图件全部用 OriginPro 8.5 绘制。

2 结果与分析

2.1 潜在蒸散量的时间变化特征

根据公式(1)计算得到陕西省 1955—2015 年潜在蒸散量的变化。陕西省 ET_0 多年平均值为 914.93 mm,年际变化率约为 1.03 mm/10 a,表明在陕西省呈现暖干化的趋势背景下, ET_0 呈现微弱上升趋势,但变化趋势不明显。从图 2A 可以看出,由于日照、相对湿度等气候因素的不同,陕西省潜在蒸散量呈现波动变化,1964 年为历年最低值(800.31 mm),1997 年为极大值(1 004.54 mm),两者之间的差值为 204.23 mm。从图 2B 蒸散量的累积距平可以看出,1964 年、1979 年、1993 年为陕西省潜在蒸散量的转折点。1955—1964 年 ET_0 呈微弱下降趋势,主要以负距平为主;1965—1979 年是 ET_0 偏多阶段,以正距平为主,呈增加趋势;1979 年达到最大值而后下降,到 1993 年达到最低,期间以负距平为主,且比多年平均值低 41.65 mm;1993—2015 年呈现略微增加趋势,主要以正距平为主。

利用 Fisher 最优分割法将 1955—2015 年陕西省潜在蒸散量进行划分,同时计算各时段的平均值、相对变率和绝对变率(表 1)。可以看出,各时段的平均 ET_0 呈“倒 S”型变化,与图 2B 累积距平曲线趋势相近;1994—2008 年时段平均 ET_0 最高,为 944.39 mm;1980—1993 年最低,仅为 873.27 mm,与最高值差 71.12 mm。除了 1994—2008 年时段的变化率最低外,其他时段的相对变率和绝对变率维持在 28 mm,0.03 的水平上。图 2C 为陕西省年均潜在蒸散量 Mann-Kendall 法检验结果曲线,UF 线在 1972 年和 1993 年超出 $\alpha=0.05$ ($y=\pm 1.96$) 信度水平,说明原系列存在显著变化趋势。综合累积距平曲线和 M-K 检验结果表明,1979 年是陕西省潜在蒸散量突变下降的开始,1993 年则是突变上升的开始。

为了更进一步分析陕西省 60 a 潜在蒸散量的年内变化情况,绘制出研究期间内季节潜在蒸散量变化曲线(图 3),同时基于 Fisher 最优分割法计算分时段季节平均潜在蒸散量及其贡献率(表 2)。从图 3 可以看出,春、秋、冬季 ET_0 年际变化率均为正值,分别

为 3.72,0.12,0.36 mm/10 a,与年 ET_0 变化一致,但变化趋势都不显著;夏季 ET_0 年际变化率为 -2.95 mm/10 a,呈减少趋势。表 2 显示出陕西省春、夏、秋、冬季平均 ET_0 依次为 278.42,385.24,164.62,87.2 mm,分别占年均 ET_0 的 30.41%,42.08%,17.95%,9.23%,季节贡献率由高到低为夏季>春季>秋季>冬季。这说明春夏两季 ET_0 占全年最多,达到 72.49%。其原因可能是春末至秋初气温偏高,有利于蒸散;秋末至次年春季,气温降低,蒸散量也随之降低;同时,7—8 月正值研究区汛期,气温升至最高,日照充足,致使 ET_0 达到年内最高值。从 4 个分时段来看,春季贡献率略微上升,夏季略微下降,秋冬季变化不大,这与图 3 四季 ET_0 年际变化率线性趋势相同。

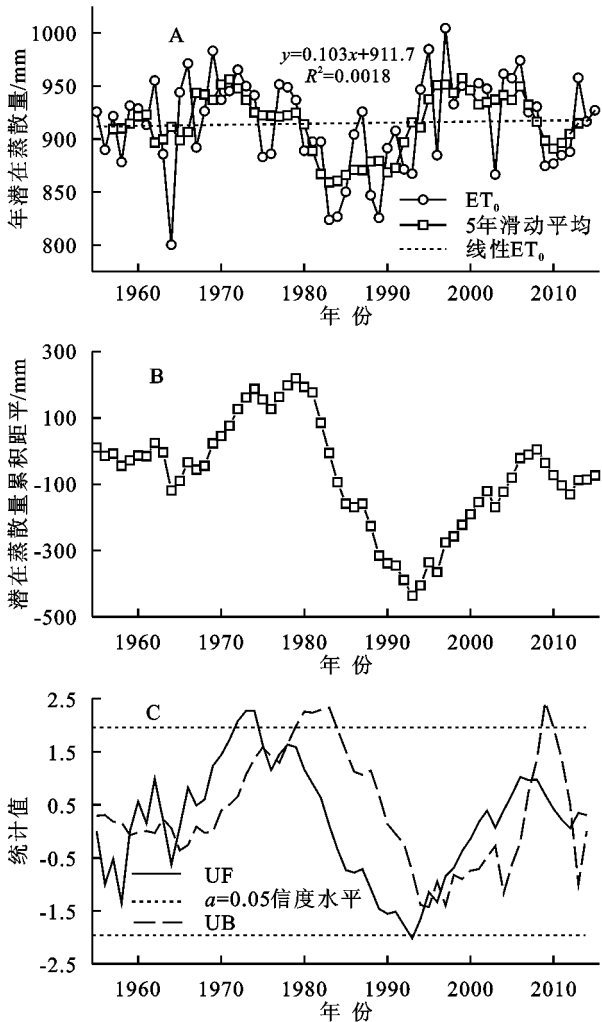


图 2 陕西省年潜在蒸散量及其累积距平、M-K 曲线

表 1 陕西省分时段年潜在蒸散量及其变率

项目	1955—1979 年	1980—1993 年	1994—2008 年	2009—2015 年
平均 ET_0 /mm	923.72	873.27	944.39	903.71
相对变率/ (mm · a ⁻¹)	29.03	28.63	24.22	25.83
绝对变率	0.031	0.033	0.026	0.029

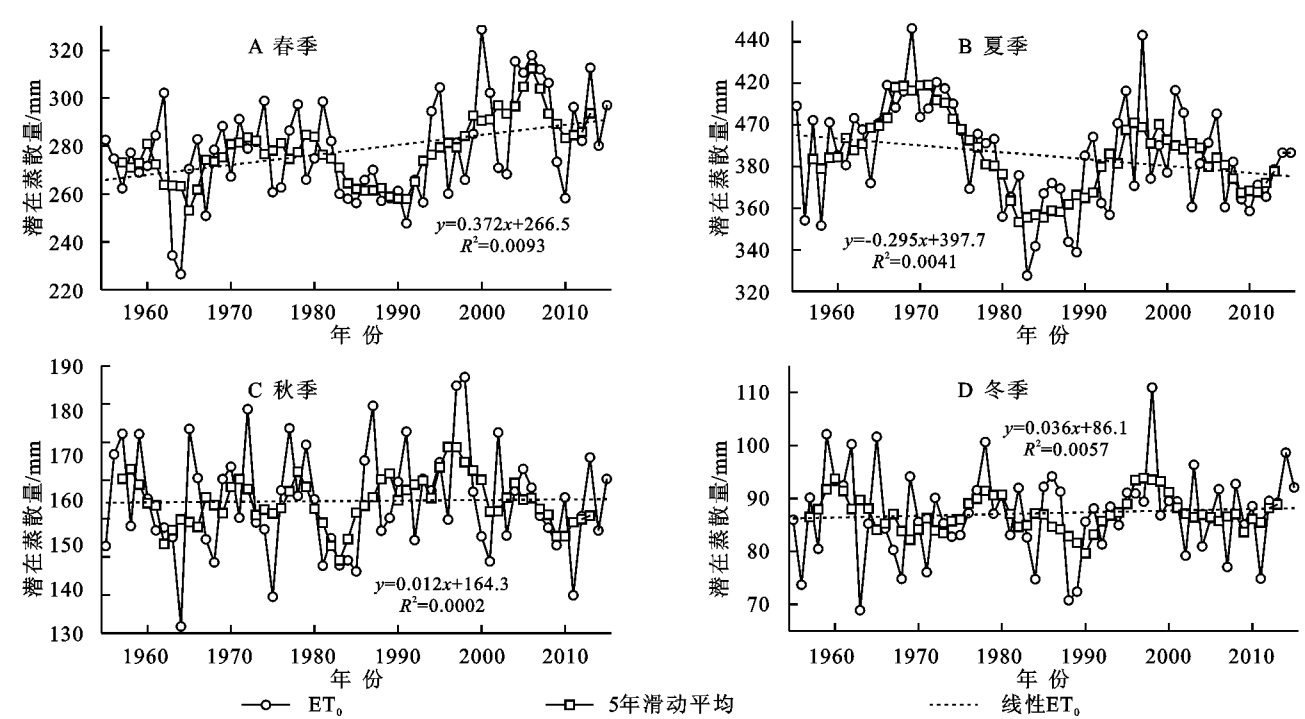


图 3 1955—2015 年陕西省季节潜在蒸散量变化曲线

表 2 陕西省分时段季节潜在蒸散量及其贡献率

季节	1955—1979 年		1980—1993 年		1994—2008 年		2009—2015 年		1955—2015 年	
	平均 ET ₀ /mm	贡献率/%	平均 ET ₀ /mm	贡献率/%	平均 ET ₀ /mm	贡献率/%	平均 ET ₀ /mm	贡献率/%	平均 ET ₀ /mm	贡献率/%
春季	273.90	29.79	265.18	30.14	294.91	31.44	285.69	31.33	278.42	30.41
夏季	398.21	43.31	361.16	41.05	391.80	41.77	373.08	40.91	385.24	42.08
秋季	160.34	17.44	168.64	19.17	162.10	17.28	164.82	18.08	164.62	17.98
冬季	87.08	9.47	84.80	9.64	89.15	9.50	88.27	9.68	87.20	9.53

2.2 潜在蒸散量的空间分布特征

由于受纬度因素的影响,陕西省气温、降水、日照等气象要素分布不均匀,致使研究区内年平均 ET₀ 的空间分布存在明显差异(图 4)。从图 4A 可以看出,陕西省 1955—2015 年年均 ET₀ 由南向北递增(826.26~1 094.42 mm),陕南<关中<陕北,表现出较为明显的纬度地带性特征,与多年平均蒸发皿蒸发量的空间分布一致^[22]。从分地区来看,陕南地区的年平均 ET₀ 为 877.29 mm,关中和陕北分别为 900.59,964.58 mm,极差达到 87.29 mm。ET₀ 在陕南地区由东向西递减,关中地区均匀分布;而陕北则以定边、绥德站点为高值中心,北高南低空间分布特征。根据各站点研究期间 ET₀ 计算期年际变化率(图 4B),陕北地区年均 ET₀ 主要呈增加趋势,关中和陕南地区则为下降趋势;其中以陕北西北部上升幅度最大,达到 18.336 mm/10 a;关中中部地区下降幅度高达-18.265 mm/10 a。这可能进一步加剧未来陕北地区暖干化与陕南地区暖湿化的发展态势^[17]。

陕西省季节平均 ET₀ 分布也具有明显的空间分异特征(图 5)。总体上看,春、夏季与年均 ET₀ 空间

分布具有高度一致性,存在较为显著的纬度地带性特征;而冬季则与年均 ET₀ 空间分布具有较大反差。

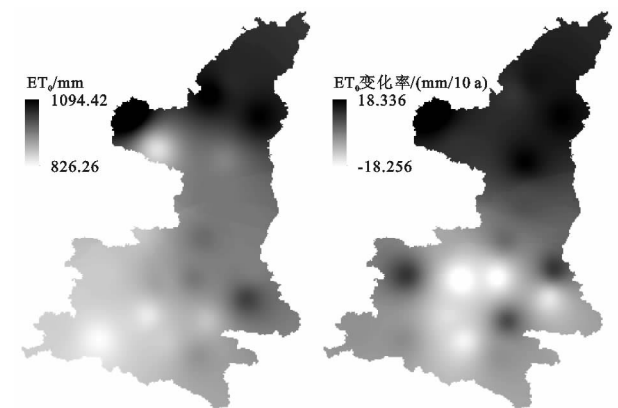


图 4 1955—2015 年陕西省年均潜在蒸散量空间分布及其年际变化率

这也间接说明了春夏季平均 ET₀ 对年均 ET₀ 的空间分布起决定性作用。春季平均 ET₀ 高值中心主要集中在陕北的定边、绥德站,陕南汉中地区则形成低值中心;且极差为四季最大,达到 249.18 mm,这深刻地影响着陕西地区春播土壤墒情。夏季平均 ET₀ 与全年分布最为相似,高值、低值中心分布也与

春季相同,极差为 146.5 mm。这与夏季陕西地区处于高温阶段,且接受的太阳辐射和日照南北差异不大,但由于陕北地区空气相对湿度较小,易形成全省年内 ET_0 极大值。秋季的高值中心主要分布在陕北西部、关中东部,低值区主要有陕南山地地区,极差为 56.38 mm。冬季平均 ET_0 与全年分布差异性最大,

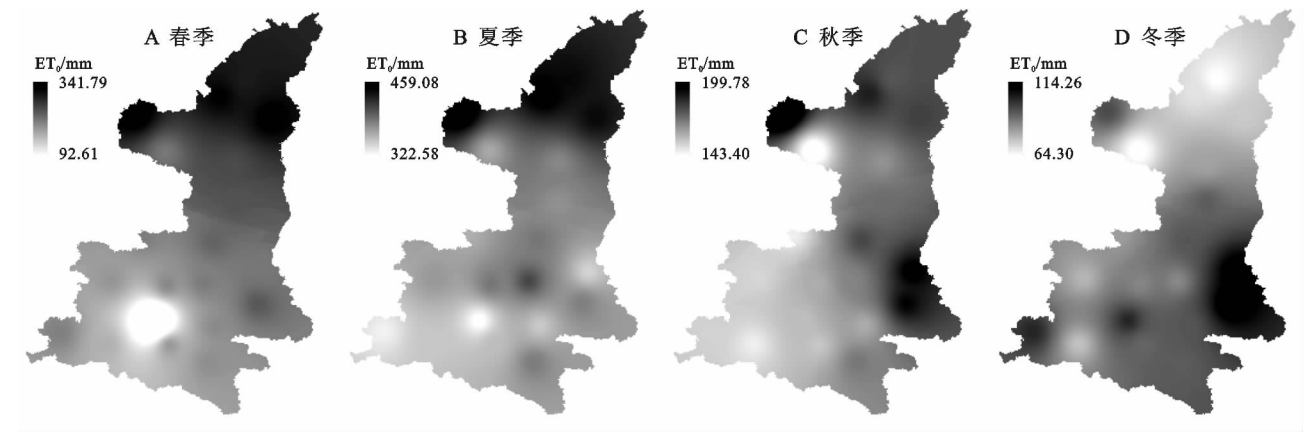


图 5 1955—2015 年陕西省季节潜在蒸散量空间分布

2.3 潜在蒸散量的时空变化原因

由于潜在蒸散量受到诸如气温、日照等多种气象因素的影响,且不同因素之间也相互影响,致使 ET_0 变化的成因相当复杂。如表 3 所示,不同气候因素对年及季节 ET_0 的影响程度不同:对年 ET_0 影响较大的因素包括风速、日照等 7 个气象因素;对春、夏、冬季 ET_0 影响显著的是风速、相对湿度等 6 个气象因素;对秋季影响较大的因素与年 ET_0 影响因素相同。从正负相关性来看,风速、日照、平均气温与全年及四季 ET_0 呈正相关,最高

呈现出南多北少的空间分布态势,高值中心分布在关中和陕南的东部地区,低值中心出现在陕北榆林等地区;同时由于冬季平均 ET_0 贡献率为四季最低(9.23%),进而导致极差也为四季最小,只有 49.96 mm。陕西省季节平均 ET_0 空间分布的变化趋势对于未来研究区合理利用年内水资源提供了科学依据。

温、最低温、相对湿度、降水等多与 ET_0 呈负相关。另外,通过多元回归模型计算出气象因素对 ET_0 的相对贡献率,可以看出不同气象因素对 ET_0 变化的影响程度具有差异性。全年平均温度对陕西省年 ET_0 有最高的相对贡献率,最高气温有较高的相对贡献率。对夏季 ET_0 最高贡献率的为日照,较高的为平均气温;春、秋、冬季 ET_0 与年 ET_0 的高相对贡献率因素相同。总体上看,平均气温是全年及春、秋、冬季 ET_0 变化的主导因素,日照是夏季 ET_0 变化的主导因素。

表 3 年及季节 ET_0 与气象因素的偏相关系数及相对贡献率

季节	项目	平均风速	日照时数	平均气温	最高气温	最低气温	相对湿度	降水量
全年	偏相关系数	0.673***	0.847***	0.780***	-0.785***	-0.563***	-0.602***	-0.639***
	相对贡献率	3.500	9.560	39.070	29.180	10.460	4.370	3.860
春季	偏相关系数	0.749***	0.635***	0.557***	-0.316**	-0.478***	-0.482***	-0.265
	相对贡献率	6.690	10.730	41.450	15.650	15.410	7.770	2.310
夏季	偏相关系数	0.813***	0.937***	0.580***	-0.433***	-0.175	-0.744***	0.013
	相对贡献率	9.000	30.010	27.980	16.170	3.560	13.170	0.100
秋季	偏相关系数	0.690***	0.574***	0.560***	-0.482***	-0.434***	-0.368**	-0.438***
	相对贡献率	5.450	9.560	35.480	21.590	17.480	5.870	4.580
冬季	偏相关系数	0.667***	0.387***	0.328**	-0.215	-0.266**	0.740***	0.006
	相对贡献率	5.690	5.640	42.180	17.630	15.970	12.840	0.050

注:*, **, *** 分别表示通过 0.1, 0.05, 0.01 的双尾置信度检验。

3 结论

(1) 1955—2015 年,陕西省年潜在蒸散量介于 800.31~1 004.54 mm,呈微弱上升趋势,变化率为 1.03 mm/10 a;其中,1955—1979 年、1994—2008 年

为 ET_0 相对高值期,而 1980—1993 年、2009—2015 年则为相对低值期;1979 年陕西省潜在蒸散量发生突变下降,1993 年则突变上升。

(2) 研究期间,春、夏、秋、冬季平均 ET_0 依次为 278.42, 385.24, 164.62, 87.2 mm, 分别占年均 ET_0

的30.41%,42.08%,17.95%,9.23%;春、秋、冬季 ET_0 年际变化率均与年 ET_0 变化一致,分别为3.72,0.12,0.36 mm/10 a;而夏季 ET_0 年际变化率为-2.95 mm/10 a,呈减少趋势。

(3) 研究区内年及季节平均 ET_0 的空间分布存在明显地带性规律特征,年均 ET_0 及其变化率与春、夏季 ET_0 呈自南向北递增的空间分布,冬季则南多北少,说明春、夏季平均 ET_0 对年均 ET_0 的空间分布起决定性作用。

(4) 平均气温是全年及春、秋、冬季 ET_0 变化的主导因素,日照是夏季 ET_0 变化的主导因素,其他因素则不同程度对 ET_0 的变化起增强或减弱作用。

参考文献:

- [1] 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,2010,61(22):2226-2234.
- [2] 邸苏闯,吴文勇,刘洪禄,等. 基于遥感技术的绿地耗水估算与蒸散发反演[J]. 农业工程学报,2012,28(10):98-104.
- [3] 董煜,海米提·依米提. 1961—2013年新疆潜在蒸散量变化特征及趋势[J]. 农业工程学报,2015,31(1):153-161.
- [4] 秦鹏,刘强. 艾比湖流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 中国农村水利水电,2017,59(6):111-117,121.
- [5] 杨志刚,唐小萍,路红亚,等. 近50年雅鲁藏布江流域潜在蒸散量的变化特征[J]. 地理学报,2013,68(9):1263-1268.
- [6] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. Rome: FAO, 1998.
- [7] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1997,85(7):55-73.
- [8] Golubev V, Lawrimore J, Groisman P, et al. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment [J]. Geophysical Research Letters,2001,28(13):2665-2668.
- [9] Dinpashoh Y, Jhajharia D, Fakheri-Fard A, et al. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran[J]. Journal of Hydrology, 2011,399(3):422-433.
- [10] 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.
- [11] 王琼,张明军,潘淑坤,等. 长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 生态学杂志,2013,32(5):1292-1302.
- [12] 童瑞,杨肖丽,任立良,等. 黄河流域1961—2012年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[J]. 水资源保护,2015,31(3):16-21.
- [13] 凯丽比努尔·克热木,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜. 喀什地区1957—2013年潜在蒸散量变化及其影响因子[J]. 水土保持研究,2017,24(5):247-251,258.
- [14] 谢平,龙怀玉,张杨珠,等. 云南省四季潜在蒸散量时空演变的主导气象因子分析[J]. 水土保持研究,2017,24(2):184-193.
- [15] 刘宪锋,潘耀忠,张锦水,等. 1960—2011年西北五省潜在蒸散的时空变化[J]. 应用生态学报,2013,24(9):2564-2570.
- [16] 蒋冲,王飞,穆兴民,等. 秦岭南北潜在蒸散量时空变化及突变特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(5):573-581.
- [17] 安彬,孙虎,刘宇峰,等. 陕西省气候及其生产潜力时空变化特征[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,2014,42(3):103-108.
- [18] 彭锐,黄河清,郑林. 鄱阳湖区1959至2005年降水过程的持续性特征与减灾对策[J]. 资源科学,2009,31(5):731-742.
- [19] 韩玮,韩永红,杨沈斌. 1961—2011年山东气候资源及气候生产力时空变化特征[J]. 地理科学进展,2013,32(3):425-434.
- [20] 魏娜,巩远发,孙娴,等. 西北地区近50a降水变化及水汽输送特征[J]. 中国沙漠,2010,30(6):1450-1457.
- [21] 张守红,刘苏峡,莫兴国,等. 阿克苏河流域气候变化对潜在蒸散量影响分析[J]. 地理学报,2010,65(11):1363-1370.
- [22] 高蓓. 基于GIS的陕西省气候要素时空分布特征研究[D]. 西安:陕西师范大学,2014.