

DOI: 10.5846/stxb201501060035

李媛, 谢应忠, 王亚娟. 宁夏中部干旱带潜在蒸散量变化及影响因素. 生态学报, 2016, 36(15): - .

Li Y, Xie Y Z, Wang Y J. Dynamic change and influencing factors of potential evapotranspiration in the middle arid region of Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

宁夏中部干旱带潜在蒸散量变化及影响因素

李媛^{1,2}, 谢应忠^{1,*}, 王亚娟²

1 宁夏大学 农学院, 银川 750021

2 宁夏大学 资源环境学院, 银川 750021

摘要:潜在蒸散量(PE, Potential Evapotranspiration)的估算与分析对于研究气候变化、监测农业旱情、提高农业水资源利用率具有十分重要的意义。在利用 FAO Penman-Monteith (FPM) 公式计算研究区 1975—2012 年 PE 日值的基础上, 采用去趋势预置白 Mann-Kendall 检验法及敏感性分析探讨了历年来 PE 的变化规律和影响因素, 将 Matlab 与 ArcGIS 相结合, 研究了 PE 及其时序趋势的空间特征。结果显示: 研究区多年平均 PE 月值呈现倒 U 形的变化规律, 最大值和最小值分别出现在 7 月和 1 月; 多年来, 同心县 PE 具有明显的增长趋势, 盐池和海原县则表现为微弱的减少。就影响因素而言, 年际尺度上, 同心县 PE 的主导因素为温度和风速, 海原县为风速和水汽压, 盐池县则以风速为主; 月际水平上, 温度的变化幅度最大, 特别是在植物的生长季节(5—9 月份)明显高于其他因素。研究区内 PE 具有明显的空间变化规律, 盐池县表现为沿经向递减, 同心和海原县则表现为沿纬向递增; 就 PE 变化趋势的空间特征而言, 盐池县大部分区域的 PE 变化不明显, 显著增加的区域仅占该县总面积的 2.52%, 同心县显著和极显著增加的区域占全县面积的 61.98%, 海原县 PE 则以微弱减少和微弱增加为主, 显著增加的区域面积比例小于 30.00%。

关键词:潜在蒸散量; Mann-Kendall 趋势检验; 敏感系数

Dynamic change and influencing factors of potential evapotranspiration in the middle arid region of Ningxia

LI Yuan^{1,2}, XIE Yingzhong^{1,*}, WANG YaJuan²

1 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 School of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Evapotranspiration consists of soil evaporation and plant transpiration. It is the main mechanism of the transfer and conversion of energy and moisture occurring in the soil-vegetation-atmosphere system. Potential evapotranspiration (PE) is the theoretical upper limit value of evapotranspiration, reflecting the land surface evapotranspiration capacity under the existing weather conditions. A reasonable estimate of PE is very important for studying climate change, monitoring agricultural drought, improving the utilization rate of agricultural water resources, and for many other purposes. At present, the input parameters of PE calculation models are based mostly on meteorological data. Among the models, the FAO Penman-Monteith (FPM) formula is suitable for both humid and arid/semiarid areas. Thus, FPM is often used as the standard method for calculating PE. This paper is based on daily meteorological data, collected from 28 sites of the study area and the surrounding area in 1975—2012, to estimate potential evapotranspiration by using FPM. The trend-free pre-whitening Mann-Kendall (TFPW-MK) test and sensitivity analysis were used to examine the change law and the factors influencing PE through the years. The spatial distribution characteristics of pixel-based PE and its variation trend were

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31160484); 国家自然科学基金资助项目(41461039)

收稿日期:2015-01-06; **网络出版日期:**2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xieyz@nxu.edu.cn

studied using Matlab and ArcGIS. The goal of the study was to provide methods and data support for ecological evaluation, disaster prevention, and agricultural structure adjustment. The conclusions of the study are as follows: 1) The change of average monthly PE from 1975 to 2012 was an inverted U-shaped curve, and the maximum and minimum values appeared in July and January, respectively. The average annual PE of Yanchi and Haiyuan counties showed a slight decreasing trend in 1975—2012, but the average annual PE of Tongxin County grew significantly, with an outstanding PE increase in March, April, and June. 2) In terms of influencing factors, in addition to net radiation, the sensitivity coefficients of various meteorological elements changed little during the study period in Yanchi County. Temperature in Yanchi County increased through the years, but wind speed decreased significantly, which is the main reason for the weak reduction of PE. In Tongxin County, the increase of wind speed, temperature, and its sensitivity coefficient would promote an increase of PE, but the increase of vapor pressure and the decrease of its sensitivity coefficient would help decrease PE. The combined result of both aspects led to significantly increased PE at the interannual scale, which shows that temperature and wind speed play a dominant role for PE in the region. In Haiyuan County, although temperature increased significantly through the years, wind speed decreased significantly, vapor pressure increased, and the temperature sensitivity coefficient decreased, resulting in slightly reduced PE. At the monthly scale, the change of temperature reached its maximum, especially in the growing season of plants (from May to September), and the influence of temperature was significantly higher than those of other factors. 3) PE in the study area had an obvious spatial variation law. PE in Yanchi County showed a decreasing trend with increasing longitude, and PE in Tongxin and Haiyuan counties showed an increasing trend with increasing latitude. For the spatial characteristics of the PE variation trend, the range of Z value calculated by the Mann-Kendall test for each pixel was -1.65 — 2.47 in Yanchi County, but the change of PE in most of the region was not obvious. Regions with significantly increased PE accounted for only 2.52% of the total area of the county. In Tongxin County, the range of Z value was 0.50 — 3.70 , and significantly and extremely significantly increased areas accounted for 61.98% of the county. The range of Z value in Haiyuan County was from -0.70 to 3.73 , and the PE variation trend of the county was a slight decrease or weak increase. The ratio of significantly increased areas was less than 30.00%.

Key Words: potential evapotranspiration; Mann-Kendall trend test; sensitivity coefficient

蒸散量包括土壤蒸发和植被蒸腾,是土壤-植被-大气系统中能量、水分传递和转化的主要途径,地表获得的 40% 以上的太阳辐射和 60% 左右的降水将以蒸散的形式消耗和返回大气中^[1],在干旱区这个比例还会有所增加,因此,蒸散量是全球能量和水分平衡的重要组成部分。潜在蒸散(PE, Potential Evapotranspiration)是蒸散量的理论上限,反映了天气条件决定下的地表蒸散能力,合理地估算和分析 PE 对于研究气候变化、监测农业旱情、提高农业水资源利用率具有十分重要的意义。

目前,关于潜在蒸散量的研究,一部分集中于对其时序变化的分析。例如:孙小舟^[2]利用联合国粮食及农业组织推荐的彭曼-蒙蒂斯公式(FPM, FAO Penman-Monteith,)对西辽河流域 11 个台站的潜在蒸散量进行计算,指出 1952—2007 年该区域 PE 整体呈现上升趋势,周秉荣^[3]的文献显示,在 1961—2012 年间三江源地区的 PE 大体上以 0.69 mm/a 的速率增加。许杏娟^[4]、王晓东^[5]等分别在研究凌河流域生长季、淮河流域时认为 PE 存在一定程度的降低。也有学者关注于 PE 的成因分析,冯禹^[6]对川中丘陵区 PE 变化的原因进行了探讨,表示日照时数和风速是引起该地区 PE 变化的主要因子。杨林山^[7]在研究中指出洮河流域 1981—2010 年 PE 的增加源于净辐射和温度的共同作用。可以看出,不同时期、不同地区,PE 的变化趋势及主导因素存在差异,因此,对 PE 的时序变化及影响因素进行地区性分析显得尤为必要。除此之外,空间分析也是 PE 研究的重要内容之一,就现有的文献而言,多是通过站点插值获得 PE 的空间分布,关于 PE 时序变化空间特征的研究则鲜有报道。实际上气象要素的变化具有复杂的空间差异,它们的不同组合,必将导致潜在蒸散量的变化趋势也呈现不同的空间特点,这在今后的研究中应予以重视。

宁夏中部干旱带地处西北内陆,水资源是限制该区域经济发展和生态恢复的主要因素,在全球气候变化的大背景下,该地区的气候有向暖干化发展的趋势,这必将导致潜在蒸散量的时空变化。鉴于此,本文利用 FPM 公式对研究区 1975—2012 年的 PE 进行计算,对其时序变化及影响因素展开分析、特别是将 Matlab 与 Arcgis 相结合,在像元水平上运用 Mann-Kendall 检验,对 PE 的变化趋势在空间上实现了定量表达,以期为干旱、半干旱区生态评估、水资源管理、农业结构调整提供方法和数据支持。

1 研究区概况

研究区主要包括盐池县、同心县和海原县 3 个典型县,北与沙坡头、中宁县、红寺堡区、灵武市、鄂托克前旗相邻,南与西吉县、原州区、环县相连,东边为定边县,西侧为靖远县和会宁县,在宁夏自然分区中属于中部干旱带,在全区整体生态环境的构建与恢复中处于重要地位。研究区的气候特征主要表现为以下几个方面:一是日照充足、年均日照时数为 2842 h,属于太阳辐射资源丰富的地区之一;二是四季分明,冬季严寒、夏季炎热,温度 7 月最高,平均为 20.0—23.1℃,1 月最低,平均为 -8.2— -6.6℃;三是风大沙多,平均风速为 2.49—2.95 m/s,春季大风日数最多,平均风速最大;四是降水稀少、平均降水量仅为 262.3—363.2 mm/a,并且季节分配不均,夏秋多、冬春少。

2 研究方法

2.1 数据来源

气象数据包括 1975—2012 年研究区及周边 28 个站点的平均温度、最高温度、最低温度、相对湿度、水汽压、降水量、风速、本站气压、日照时数的日值数据,1987—2012 年银川和固原站的太阳总辐射日值数据。数据来源于宁夏气象局及中国气象科学数据共享服务网。

2.2 研究方法

2.2.1 潜在蒸散量的计算

利用 FPM 对研究区潜在蒸散量的日值进行计算,具体计算方法见文献^[8]。在 PE 的计算过程中,太阳总辐射是重要的参数之一,由于进行辐射测量的站点有限,对于没有辐射数据的台站,可以利用 Angstrom-Prescott 方程获取,即

$$R_s = (c + dn/N)R_a \quad (1)$$

其中, R_s 为太阳总辐射, n/N 为日照百分率,是气象台站的常规观测项目, R_a 为天文太阳辐射,可通过计算获得^[9], c 、 d 为拟合参数,FPM 公式推荐值分别为 0.2 和 0.5。然而,不同区域由于地理位置、气候等因素的影响,参数取值存在空间变异^[10]。李韧^[11]对青藏高原及周边 22 个站点进行研究确定适合青藏高原的 c 、 d 值分别为 0.213 和 0.5691。韩虹等人^[12]利用大同、东胜、太原、延安、侯马、郑州、西安 7 个台站的数据拟合得到的黄土高原辐射量模型中的 c 、 d 分别为 0.1776 和 0.5470。因此,有必要确定适合研究区域特点的拟合方程。

在宁夏,对太阳辐射进行测量的台站有 2 个,即银川和固原站。选用 1987—2010 年的数据进行拟合,2011 和 2012 年的数据进行检验,结果显示平均绝对误差、平均相对误差和标准差分别在 1.6、11% 和 2.1 以内,预测值与实测值相关系数分别为 0.9743 和 0.9638。最终取 2 站 c 、 d 的均值作为各台站太阳总辐射的拟合参数,拟合模型可表示为 $R_s = (0.191 + 0.5692n/N)R_a$ 。利用该模型可获得各台站的太阳总辐射。

2.2.2 Mann-Kendall 分析

Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法,最初由 Mann 和 Kendall 提出,并因此而命名。其优点在于不需要样本符合一定的分布,不受少数异常值的干扰。但是,数据的自相关性会对分析结果产生影响。因此,本文选用去趋势预置白处理的方法对数据进行预处理^[13],以消除自相关性带来的影响。Mann-Kendall 趋势分析的方法如下。

对于待分析序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$,原假设为该序列无趋势,首先计算 $S = (s_1, s_2, \dots, s_k, \dots, s_n)$

$$s_k = \sum_{i=k+1}^n f(x_i - x_k) \quad (2)$$

$$f(x_i - x_k) = \begin{cases} 1, & (x_i - x_k) > 0 \\ 0, & (x_i - x_k) = 0 \\ -1, & (x_i - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$SZ = \sum_{i=1}^{n-1} s_k \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{SZ - 1}{\sqrt{\text{Var}(SZ)}}, & SZ > 0 \\ 0, & SZ = 0 \\ \frac{SZ + 1}{\sqrt{\text{Var}(SZ)}}, & SZ < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Var} = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

如果,在一定的显著性水平 α 下, $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ (当 $\alpha=0.05, Z_{1-\alpha/2}=1.96$; 当 $\alpha=0.01, Z_{1-\alpha/2}=2.58$), 则拒绝原假设, 即在该显著性水平上序列 X 存在明显的上升 ($Z>0$) 或下降 ($Z<0$) 趋势。

2.2.3 敏感系数的计算

敏感性分析是定量表达模型输入参量对输出参量影响程度的有效方法之一, 高敏感性输入参量的变化是导致输出参量变化的重要原因。在潜在蒸散量的计算过程中, 温度、风速、水汽压和净辐射等都会对 PE 产生影响, 为了分析各气象要素对 PE 的影响程度, 引入敏感系数的概念, 表达式如下。

$$w_i = \frac{\partial PE}{\partial x_i} \cdot \frac{|x_i|}{PE} \quad (7)$$

其中, w_i 为第 i 个气象要素的敏感系数; x_i 为第 i 个气象要素的取值; 为潜在蒸散量对第 i 个气象要素的偏导数。

2.2.4 空间分析方法

利用宁夏及周边 28 个站点的气象数据采用 FPM 公式计算各站点 1975—2012 年 PE 的年度值, 并加以平均得到各站点 PE 的多年平均值, 在 ArcGIS 中通过反距离加权插值 (IDW, Inverse Distance Weighted) 获得研究区 PE 的空间分布, 将其转化为点图后进行空间趋势分析。

为了进一步探究 PE 变化趋势的空间特征, 首先, 在 Arcgis 中通过 IDW 插值及裁剪获得研究区 1975—2012 年各年 PE 空间分布的栅格图, 将其转化为点图后导出数据 data1; 其次, 在 Matlab 中导入 data1, 利用 Mann-Kendall 法计算各像元点的 Z 值并导出数据 data2; 再次, 在 Arcgis 中对 data2 进行插值得到研究区 PE 变化趋势的空间分布, 并根据 Z 的大小将其划分为 6 个区间, 即 $(-\infty, -2.58]$ 、 $(-2.58, -1.96]$ 、 $(-1.96, 0]$ 、 $(0, 1.96)$ 、 $[1.96, 2.58)$ 、 $[2.58, \infty)$, 分别对应变化趋势的极显著减少、显著减少、弱减少、弱增加、显著增加和极显著增加; 最后, 统计各区间所占面积。

3 结果分析

3.1 潜在蒸散量的时序变化

3.1.1 月际变化

图 1 中, 曲线上的各点表示 1975—2012 年盐池站、同心站和海原站各月份 PE 的多年平均值, 可以看出, PE 具有明显的月际变化特征, 1 月 PE 处于全年的最低水平, 约为 25.55—31.08 mm, 之后 PE 逐渐增加, 在 7 月达到最大值 (146.75—170.97 mm), 8 月开始又逐渐减小, 整体呈现出倒 U 形的变化规律。3 个县在 5—8 月月均蒸散量差异明显, 其中, 同心县的潜在蒸散量最大, 其次为盐池县, 海原县最小。

3.1.2 年际变化

图 2 显示,盐池县的潜在蒸散量大致经历了 2 次明显的上升和下降过程,即 1975—1982 年和 1988—1997 年 PE 呈现上升趋势,增加幅度分别为 62.63 和 193.40 mm;1982—1986 年和 1997—2012 年 PE 呈现下降趋势,减少幅度分别为 82.43 和 191.48 mm;1987 年由于温度的显著增加导致 PE 的异常升高。总体而言,37 年来盐池县平均潜在蒸散量为 1075.54 mm/a。同心县的潜在蒸散量表现为波动上涨的趋势,最低值出现在 1985 年为 1077.23 mm,最高值出现在 2005 年为 1250.80 mm,平均值为 1159.88 mm/a。海原县的 PE 在 2000 年以前在中间值附近震荡,2001 年开始出现持续下降,同样由于温度的影响在 1987 年出现异常升高,多年平均 PE 为 1058.12 mm/a。

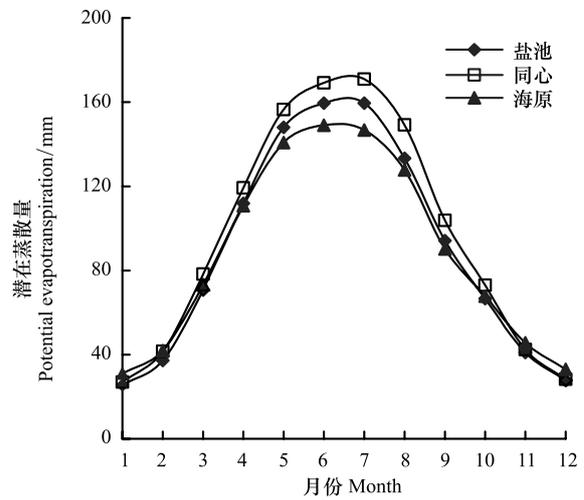


图 1 研究区潜在蒸散量的月际变化

Fig.1 Monthly level variation of PE in study area

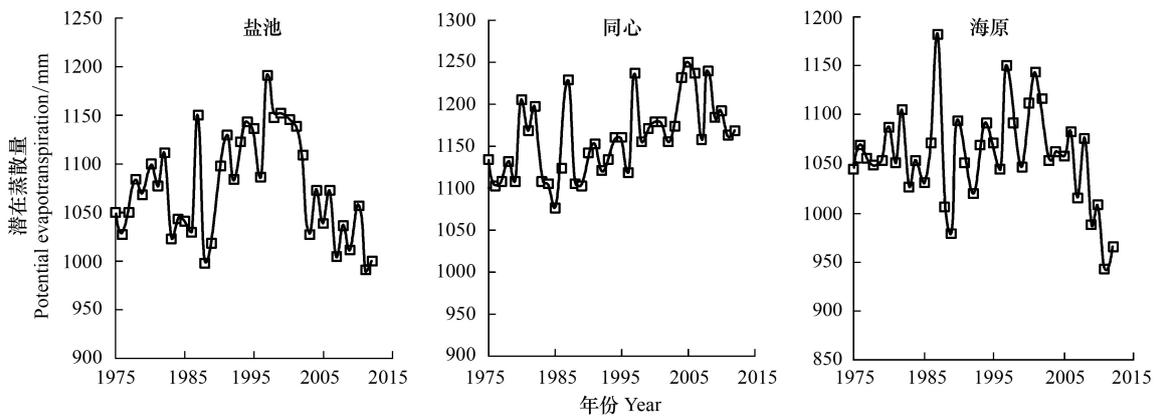


图 2 研究区潜在蒸散量年际变化

Fig.2 Interannual variation of PE in study area

Mann-Kendall 趋势分析表明(表 1),盐池县和海原县的潜在蒸散量整体趋于减少,但趋势不明显,Z 值均未通过显著性水平为 0.05 的检验,同心县则表现为显著的增长趋势。进一步分析 1975—2012 年各月 PE 的变化特征,可知看出,盐池县各月份 PE 未出现明显变化,同心县除 1 月份外,各月 PE 均表现为增加的倾向,特别是在 3 月、4 月和 6 月增加趋势明显,这在一定程度上促进了该县潜在蒸散量年值的持续增长。与之相反,海原县多数月份 PE 有减少的倾向,其中,12 月的减少趋势明显,其余月份未通过检验。

表 1 1975—2012 年 PE 年值及月值的 Mann-Kendall 趋势分析结果(Z)

Table 1 Results of Mann-Kendall trend analysis (Z) of PE annual and monthly value from 1975 to 2012

研究区 Study area	PE 年值的分析结果 Analysis results of annual value	PE 月值的分析结果 Analysis results of monthly value											
		1 月 Jan	2 月 Feb	3 月 May	4 月 Apr	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug	9 月 Sep	10 月 Oct	11 月 Nov	12 月 Dec
盐池	-1.66	-1.36	0.53	1.71	0.08	-0.38	0.13	-1.33	-0.68	-1.79	-0.18	0.38	-0.75
同心	3.72 **	-0.20	1.66	3.12 **	2.06 *	1.43	2.04 *	1.01	0.85	0.38	0.40	1.86	0.40
海原	-0.70	-1.84	-0.48	0.75	0.58	-1.21	0.91	-0.58	-0.88	-1.81	-1.41	-1.13	-2.11 *

* $\alpha=0.05$ 时趋势明显(双侧), ** $\alpha=0.01$ 时趋势明显(双侧), 无标记表示 $\alpha=0.05$ 时趋势不明显

3.2 潜在蒸散量的影响因素分析

研究显示^[14-15],不同区域 PE 的时序变化趋势不尽相同,这种差异主要来源于影响 PE 的主导气象因素及其变化规律的不同,因此,要探究研究区 PE 随时间变化的内在根源,还必须从各因素的影响程度入手。对潜在蒸散量产生直接影响的气象因素有净辐射、温度、风速、水汽压,计算其敏感性系数有助于对引起 PE 变化的主导因素进行定量分析。如图 3 所示,净辐射、温度和风速的敏感系数均为正值,这 3 个因素对 PE 起到正向推动的作用,即它们的增加会促进 PE 的增加,相反,水汽压则起到负向作用。

就影响程度而言,各因素敏感系数多年平均值的排列顺序为:温度>净辐射>水汽压(绝对值)>风速。可见,温度对研究区潜在蒸散量最为敏感,在其它气象条件不变的情况下,温度升高 10%,PE 将增加 6.40%—7.00%。如表 2 所示,从单一要素敏感系数的变化趋势来看,38 年间,同心县温度的敏感系数有所增加,水汽压的敏感系数则显著减少,说明温度对 PE 的影响在

不断增大,由于水汽压的敏感系数为负值,减少表明其对 PE 的削减作用有所加强,同时,该县在研究时段内温度、风速、水汽压的增势明显。一方面风速、温度及其敏感系数的增加会促进 PE 的上升,另一方面,水汽压的增加及其敏感系数的下降有助于 PE 的减少,两方面的博弈结果最终导致 PE 在年际尺度的显著增加,说明温度和风速在该区域对 PE 起到主导作用。海原县净辐射、温度和风速的敏感系数分别通过了显著性水平为 0.01 和 0.05 的 Mann-Kendall 检验,呈现明显的上升和下降,与此同时,由于风速随时间大幅减少,水汽压逐渐增加,即使温度持续升高,PE 总体上表现为微弱的减少趋势。盐池县除净辐射外各因素的敏感系数均未有明显趋势,且净辐射多年来变化不大,因此,在风速减少的影响下 PE 趋于下降但趋势不明显。

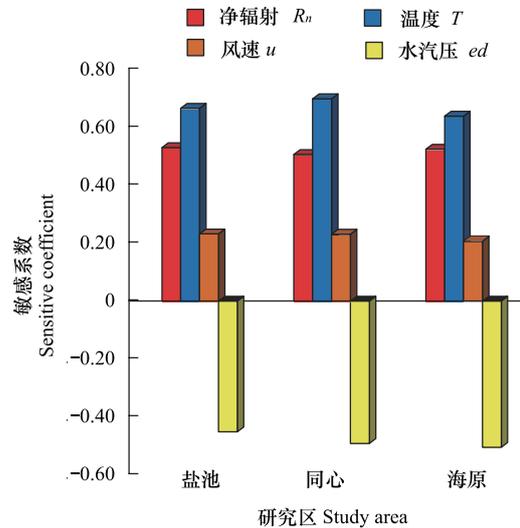


图 3 1975—2012 年 PE 影响因素敏感系数的平均值
Fig.3 Averages of sensitive coefficients of different PE influence factors from 1975 to 2012

表 2 1975—2012 年气象要素及其敏感系数的 Mann-Kendall 趋势分析结果 (Z)

Table 2 Results of Mann-Kendall trend analysis (Z) of meteorological elements and its sensitive coefficients from 1975 to 2012

研究区 Study area	气象要素 Meteorological elements				气象要素敏感系数 Sensitive coefficients of meteorological elements			
	净辐射 Net radiation	温度 Temperature	风速 Wind speed	水汽压 Vapor pressure	净辐射 Net radiation	温度 Temperature	风速 Wind speed	水汽压 Vapor pressure
	盐池	-0.93	1.21	-3.65**	1.66	2.34*	0.10	-1.48
同心	0.83	3.12**	3.07**	3.12**	-1.66	3.17**	-0.48	-2.94**
海原	0.60	4.05**	-5.98**	2.04*	4.00**	-2.46*	-2.39*	1.84

* $\alpha=0.05$ 时趋势明显(双侧), ** $\alpha=0.01$ 时趋势明显(双侧), 无标记表示 $\alpha=0.05$ 时趋势不明显

图 4 是盐池县各气象要素敏感系数多年月均变化曲线,其中,水汽压的值为负,为了更加清楚地反映该要素与其它要素在数值上的大小关系,绘制了水汽压绝对值的逐月变化曲线,见图 4 中虚线部分,可以看出水汽压敏感系数的绝对值始终大于风速,并且在 4—10 月均小于温度和净辐射。净辐射的敏感系数为 0.30—0.69,从 1 月开始逐渐增加,在 8 月达到最大值然后降低,7—9 月的值明显高于其他月份。风速的敏感系数的月际变化也有一定规律,从 1 月份开始逐渐下降到 8 月份达到最低值,然后逐步上升到 12 月份达到最大值。与其它因素相比,温度敏感系数的月际变化幅度最大,约为 0.77,在 3—11 月形成明显的单峰曲线。从各因素的比较可以看出,在植物的生长季节(5—9 月份)温度的敏感系数明显高于其他因素,也就是说在研究区生长

季温度过高会正向推动潜在蒸散量,加剧植被生长受到水分胁迫的影响程度。同心与海原县气象要素敏感系数的月际变化规律与盐池县相似。

3.3 潜在蒸散量及其变化趋势的空间分布特征

图 5 显示了研究区潜在蒸散量的空间分布特征,图中 x, y 和 z 分别代表经度、纬度和 PE,点表示 PE 在面 xoz, yoz 和 xoy 上的投影,曲线是对投影点进行二项式拟合的结果。可以看出,盐池县的 PE 随经度的增加呈现减少的趋势,高值区主要分布在西南部的惠安堡,东北部地区是低值相对集中的区域。同心县 PE 在经度方向分布较为分散,总体趋势不明显,在纬度方向有明显的变化规律,即随着纬度的减少,PE 先小幅增加后持续降低,东北部的韦州镇附近是 PE 相对较大的区域,南部 PE 最小。海原县与同心县相似,PE 在纬向的变化显著,在 yoZ 面上投影点分布在趋势线两侧很窄的区域内,PE 与纬度几乎呈线性递减的关系。

表 3 反映了 1975—2012 年 PE 变化趋势的空间分布特征,盐池县各像元 Mann-Kendall 分析中 Z 值的范围为 $-1.65—2.47$,大部分区域的 PE 变化不明显,其中,微弱减少的区域主要集中在花马池镇附近,其余大部分区域为微弱增加,显著增加的区域仅占该县总面积的 2.52%,主要分布在高沙窝和惠安堡的西北角。同心县的 Z 值范围为 $0.50—3.70$,PE 均表现为一定程度的增加,其中,显著和极显著增加的区域占全县面积的 61.98%,分别位于该县的西部和南部地区。海原县 Z 值在 $-0.70—3.73$ 变动,全县 PE 以微弱减少和微弱增加为主,显著增加的区域面积比例小于 30.00%,分布在该县的北部地区。

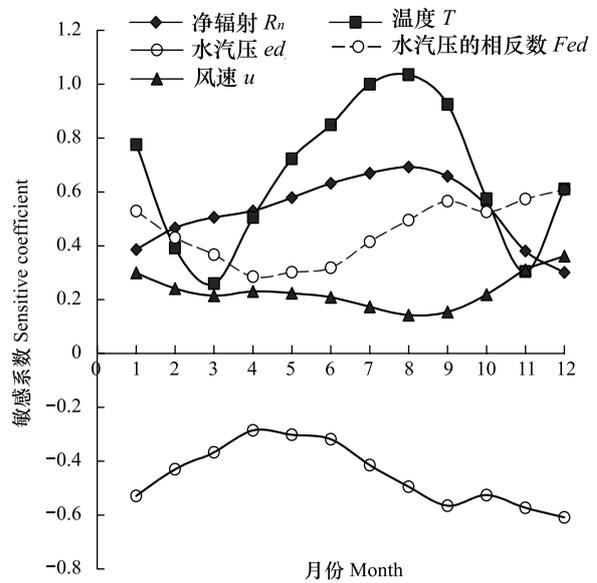


图 4 盐池县 PE 影响因素敏感系数的月际变化
Fig.4 Monthly variation of sensitive coefficients of different PE influence factors in Yanchi county

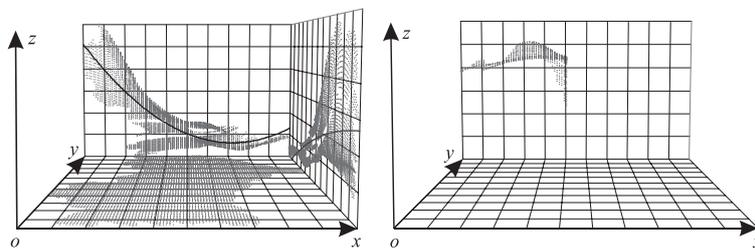


图 5 研究区 PE 的空间分布
Fig.5 Space distribution of PE in study area

表 3 1975—2012 年研究区潜在蒸散量变化趋势的空间分布
Table 3 Spatial distribution of PE variation trend in study area from 1975 to 2012

Z 值区间 Intervals of Z	变化特征 Change characteristics	各区间所占的面积比例 Area ratios of different intervals/%		
		盐池	同心	海原
$[-\infty, -2.58]$	极显著减少	0	0	0
$(-2.58, -1.96]$	显著减少	0	0	0
$(-1.96, 0]$	微弱减少	22.36	0	9.08
$(0, 1.96)$	微弱增加	75.12	38.02	61.16
$[1.96, 2.58)$	显著增加	2.52	29.44	14.99
$[2.58, \infty]$	极显著增加	0	32.54	14.77

4 结论与讨论

本文采用 FPM 计算潜在蒸散量,从月际和年际 2 个尺度,分析了 PE 的时序变化规律、探讨了各气象因素对 PE 的影响程度,并对 PE 及其变化趋势的空间特征进行了研究,得到如下结论:

1) 研究区多年平均 PE 月值呈现倒 U 形的变化规律,最大值和最小值分别出现在 7 月和 1 月;1975—2012 年间,盐池和海原县 PE 表现为微弱的减少趋势,同心县 PE 的年增势显著,突出表现为 3、4、6 月 PE 的明显增加。说明由于估算潜在蒸散量的各气象要素受区域、地形等因素的影响,具有复杂的时空分布差异,它们的不同组合最终将导致 PE 年际变化趋势的地域性差异。

2) 年际尺度上,各影响因素的敏感性分析显示:温度对 PE 的敏感性最强。然而,38 年来,盐池和海原县年均温度均有不同程度的增加,但 PE 却呈微弱减少,说明仅从比较敏感系数本身来解释 PE 的变化原因是不够全面的,应将各气象要素的变化趋势、敏感系数及其变化特征相结合,系统地探讨区域 PE 变化的缘由。研究期内,在除净辐射外各气象要素敏感系数变化不大的情况下,虽然盐池县的温度有一定升高,但风速的显著下降成为促使 PE 呈现微弱减少的主要动因。这与曹雯^[16]、尹云鹤^[17]等的研究结果相一致。

一般而言,风速增大,地表或植被表层的蒸汽压降低,将促进蒸散的发生。在过去 30—50 年里,全球范围内中纬度地区地表风速呈现减少,而高纬度地区则表现为增加。与 50 年代相比,90 年代中国平均风速减少了大约 16%,这种趋势在西北地区更为显著^[18]。越来越多的研究显示部分地区风速的减少是导致潜在蒸散量减少的主导因素。而风速的变化与大气环流有着密不可分的联系^[19],就西北地区而言,北半球大气活动中心 and 西风急流北移,加之气候变暖导致的冬、夏季风的减弱,可以在一定程度上解释风速减少的原因。除此之外,人类活动造成的下垫面改变以及局部地形等也会对风速构成影响。

海原县虽多年来温度的增加显著,但风速的大幅降低、水汽压的增加以及温度敏感系数的下降最终导致了 PE 的略微减少。同心县风速、温度及其敏感系数的显著增加决定了 PE 的显著上升。各因素在月际水平上的影响规律有所差异,其中,温度敏感系数的月际变化幅度最大,特别是在植物的生长季节影响程度明显高于其他因素。

3) 就研究区内部 PE 的空间分布规律而言,盐池县表现沿经向递减,同心和海原县主要是沿纬向递增。基于像元点的 PE 趋势分析显示,PE 的时序变化存在一定的空间差异。

参考文献 (References):

- [1] 张雨航. 柴达木盆地蒸散量的估算及其影响因素分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [2] 孙小舟, 封志明, 杨艳昭. 西辽河流域 1952 年—2007 年参考作物蒸散量的变化趋势. 资源科学, 2009, 31(3): 479-484.
- [3] 周秉荣, 李凤霞, 肖宏斌, 胡爱军, 颜亮东. 三江源区潜在蒸散时空分异特征及气候归因. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2068-2077.
- [4] 许杏娟, 陈涛涛, 吴奇, 王子凤, 郑俊林, 迟道才. 辽宁省凌河流域生长季参考作物腾发量变化及气候要素贡献分析. 中国农业气象, 2015, 36(1): 33-42.
- [5] 王晓东, 马晓群, 许莹, 刘瑞娜, 曹雯, 朱浩. 淮河流域参考作物蒸散量变化特征及主要气象因子的贡献分析. 中国农业气象, 2013, 34(6): 661-667.
- [6] 冯禹, 崔宁博, 魏新平, 赵璐, 王君勤. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析. 农业工程学报, 2014, 30(14): 78-86.
- [7] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 杨文瑾. 洮河流域潜在蒸散的气候敏感性分析. 农业工程学报, 2014, 30(11): 102-109.
- [8] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998: 25-70.
- [9] 邓艳君, 邱新法, 曾燕, 施国萍. 几种水平面太阳总辐射量计算模型的对比分析. 气象科学, 2013, 33(4): 371-377.
- [10] Wang C L, Yue T X, Fan Z M. Solar Radiation Climatology Calculation in China. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(2): 132-138.
- [11] 李韧, 赵林, 丁永建, 吴通华, 肖瑶, 辛羽飞, 孙琳婵, 胡国杰, 邹德富, 焦永亮, 秦艳慧. 近 40a 来青藏高原地区总辐射变化特征分析. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1319-1327.
- [12] 韩虹, 任国玉, 王文, 朱临洪, 吴占华, 张红雨. 黄土高原地区太阳辐射时空演变特征. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 61-66.
- [13] Yue S, Pilon P, Phinney B. Canadian Streamflow Trend Detection: Impacts of Serial and Cross-correlation. Hydrological Sciences Journal, 2003,

48(1): 51-63.

- [14] 刘园, 王颖, 杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素. 生态学报, 2010, 30(4): 923-932.
- [15] 张淑杰, 张玉书, 隋东, 蔡福, 武晋雯, 纪瑞鹏, 陈鹏狮, 刘庆葵. 东北地区参考蒸散量的变化特征及其成因分析. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1750-1761.
- [16] 曹雯, 申双和, 段春锋. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因. 生态学报, 2012, 32(11): 3394-3403.
- [17] 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. 科学通报, 2010, 55(22): 2226-2234.
- [18] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 虞俊. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.
- [19] 江滢, 罗勇, 赵宗慈, Zhu J H. 中国及世界风资源变化研究进展. 科技导报, 2009, 27(13): 96-104.