

渭河流域关中段潜在蒸发量时空变化特征

刘 闻, 曹明明, 邱海军, 郭 帅, 李 菁

(西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: 根据渭河流域关中段 11 个主要代表气象站点 1955~2012 年逐日气象数据, 以 FAO Penman-Monteith 公式得出潜在蒸发量, 分析渭河流域关中段潜在蒸发量的时空变化特征。结果表明: ① 渭河流域关中段年平均潜在蒸发量在 1 073.9~1 284.1 mm, 流域内多年平均蒸发量随着海拔的降低逐渐增高。② 夏季潜在蒸发量在 327.6~547.2 mm, 占全年的 34%~42%, 变化趋势与全年潜在蒸发量变化趋势高度一致。③ 渭河关中段随气温上升, 潜在蒸发量减少。④ 年均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。

关 键 词: 潜在蒸发量; FAO Penman-Monteith 公式; 渭河流域关中段

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2014)09-1145-08

在水文循环中, 蒸发是一个重要过程, 与地表水量平衡以及能量平衡紧密相关。虽然实际蒸发量更有助于深刻认识复杂景观的生态水文过程^[1], 但是由于实际蒸发量观测资料的缺乏, 人们往往参照潜在蒸发量来估算实际蒸发量^[2]。目前获取区域潜在蒸发量主要通过估算模拟, 估算潜在蒸发量的方法有: 气候学方法(包括基于气温的方法、基于太阳辐射的方法以及 Penman-Monteith 公式方法)、微气象学方法(包括基于质量守恒定律的方法、空气动力学方法)、蒸发皿方法。其中, Penman-Monteith 公式具有较强的物理意义, 在对潜在蒸发量的影响因素分析^[3,4]、潜在蒸发敏感性分析^[2,5,6]、水循环模拟^[7]中广为应用。FAO 于 1998 年对 Penman-Monteith 公式进行了修正, 推荐替代方程, 解决公式中某些参数(水汽传输的空气动力学阻抗、水汽传输的地表阻抗)不易获取的问题。经过修正的 FAO Penman-Monteith 公式被应用于不同气候类型区, 包括西北干旱区的天山山区^[8]、塔河流域^[3]、东部季风区的松嫩平原^[9]、秦岭山区^[10]、汉江流域^[11]、海河流域^[12], 以及青藏高原区^[13], 并且在横跨几个气候区的黄河流域^[14]、黄土高原区^[15], 甚至全国^[4,16]以及国外众多区域^[17,18]也得到了应

用。影响潜在蒸发的因素归结于自然界的气象要素变化^[8-15]和人类活动的影响^[4]。气象要素影响方面, 有研究认为从全球范围来看, 云量或者气溶胶增加引起的辐射量下降是引起潜在蒸发量发生变化的主要因素^[19], 然而也有研究认为云量对辐射产生影响的同时, 也会影响到气温日较差^[20], 而且天文因子、大气因子、地表因子等都影响着到达地面的太阳辐射^[21], 气象要素错综复杂, 相互影响, 定量模拟相当复杂。人类活动影响方面主要集中在农业引水灌溉面积增加^[12]以及下垫面改变^[22]。本文利用渭河流域关中段 11 个主要代表气象站点 1955~2012 年的逐日气象数据, 通过 FAO Penman-Monteith 公式得出潜在蒸发量, 分析渭河流域关中段潜在蒸发量的时空变化特征, 并试图讨论潜在蒸发量下降的影响因素。

1 研究区概况

渭河是黄河的第一大支流, 发源于甘肃鸟鼠山, 至陕西潼关入流黄河。渭河关中段即为渭河流经陕西关中的地段, 属于渭河的中下游(图 1)。该区域北与陕北地区的黄龙山相邻, 南以陕南地区的秦岭主脊为界, 主要由渭河及其支流冲积而成的洪

收稿日期: 2013-05-23; **修订日期:** 2013-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(41371274)、水利部公益性行业专项经费项目(201201081-82)、西北大学研究生创新项目(YZZ12002)、西北大学科学研究基金(12NW32)资助。

作者简介: 刘 闻(1985-), 女, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要从事土地利用、人类活动与气候变化的水文水资源效应研究。E-mail: liuwen0122@163.com

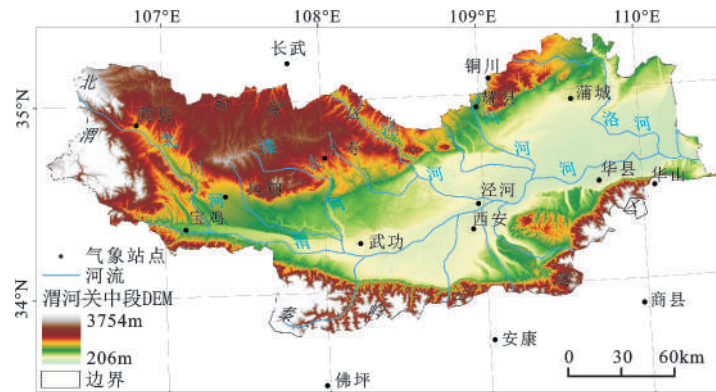


图1 研究区气象台站分布

Fig.1 The distribution of meteorological stations in study area

积冲积平原、山前洪积扇群组成。气候上属于大陆性气候区,雨量较多,雨热同季。全区涵盖5市1区,总面积约 $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,占陕西省1/3的国土面积,聚集了全省2/3的人口,是陕西省的经济枢纽。

2 数据处理与方法

利用11个气象站点(表1)的日最低气温、日照时数、日平均相对湿度、日最低相对湿度、日平均风速等气象资料,统计出各气象站的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月平均日照时数、月平均平均相对湿度、月平均最低相对湿度、月平均风速等气象指标,计算出月潜在蒸发量,然后进行季、年潜在蒸发量的计算。文中按照通常的季节划分方法,春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)和冬季(12月至翌年2月)。

表1 渭河流域关中段气象站点经纬度及海拔高度

Table 1 Latitude, longitude and altitude of meteorological stations in Weihe Basin

站 名	N	E	海拔高度(m)
陇县站	34°54'	106°50'	924.2
凤翔站	34°31'	107°23'	781.1
宝鸡站	34°21'	107°08'	612.4
永寿站	34°42'	108°09'	994.6
武功站	34°15'	108°13'	447.8
西安站	34°18'	108°56'	396.9
耀县站	34°56'	108°59'	710.0
铜川站	35°05'	109°04'	978.9
蒲城站	34°57'	109°35'	499.2
华山站	34°29'	110°05'	2064.9
泾河站	34°26'	108°58'	410.0

2.1 Penman-Monteith 公式

应用1998年世界粮农组织推荐并修订的Penman-Monteith公式计算潜在蒸发量。

$$E_{ET_0} = E_{ET_{rad}} + E_{ET_{aero}} \quad (1)$$

其中, E_{ET_0} 为潜在蒸发量, $E_{ET_{rad}}$ 为辐射项,单位为mm/d, $E_{ET_{aero}}$ 为空气动力学项,单位为mm/d。

$$E_{ET_{rad}} = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

$$E_{ET_{aero}} = \frac{\gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中, R_n 为净辐射,单位为 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; Δ 为饱和水汽压对温度的导数,单位为 $\text{kPa}/^\circ\text{C}$,即在平均气温时饱和水汽压曲线的斜率; G 为土壤热通量,单位为 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; γ 为干湿常数,单位为 $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; U_2 为2 m高处风速,单位为 m/s ; e_s 为平均饱和水汽压,单位为 kPa ; e_a 为实际水汽压,单位为 kPa ; T 为平均温度。

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (4)$$

$$R_{ns} = (1 - a)[a + b(n/N)]R_a \quad (5)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] (c - d\sqrt{e_a})(e \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - f) \quad (6)$$

式中, R_{ns} 为净短波辐射,单位为 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; R_{nl} 为净长波辐射,单位为 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; N 为最大日照时数,单位为 h ; n 为实际日照时数,单位为 h ; R_a 为大气顶层的太阳辐射,单位为 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 $[4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 。 $a=0.281$ 、 $b=0.441$ 、 $c=0.34$ 、 $d=0.14$ 、 $e=1.35$ 、 $f=0.35$, $T_{\max,k}$ 为绝对最高温度, $T_{\min,k}$ 为绝对最低温度,单位为 K ; R_s 为最大日照时数,单位 h ; R_{so} 为实际日照时数,单位 h ; 其余各项参数的计算均采用FAO推荐的标准。

2.2 Spline 插值法

进行空间分析的插值方法主要有反距离权重法、梯度加反距离平方法、光滑样条插值法和克里金插值法等。朱国锋^[23]等对 IDW 法、Kriging 法和 Spline 法做验证和比较,发现样条法对潜在蒸发量插值的效果明显优于其他方法。

Spline 法插值属于精确插值方法,通过将一个使表面整体曲率减小为最小的数学函数来估算单元值,所得的表面较为平滑,其拟合表面通过已知点,此方法适宜于变化的表面,在样本点差异不是很大时的适用性较好,Spline 法插值易操作,计算量小,不需要对空间方差的结构做预先估计,也不需要统计假设^[24],多被应用于对气象要素的空间插值研究^[25],其表达式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^n \lambda_i R(\gamma_i) + T(x, y) \quad (7)$$

式中, Z 为气象要素的预测值; n 为样本数; λ_i 为一系列线性方程所确定的系数, γ_i 是估算点到 i 个样本点的距离; $R(\gamma_i)$ 是关于 γ_i 的表面函数, $T(x, y)$ 为局部趋势函数, x, y 为插值点的地理坐标。

3 结果与分析

3.1 潜在蒸发量的时空分布特征分析

渭河流域关中段年平均潜在蒸发量表现出明显的经度地带性(图2),东西方向依次更替。潜在蒸发量的低值区位于西部的关山山脉及千山山脉一带,年均蒸发量最低值 1 073.9 mm,高值区出现在东部平原区,最高值 1 284.1 mm,东西向最大高低值相差 185.5 mm。流域内的多年平均蒸发量随着海拔的降低表现出自西向东逐渐增高,海拔大

于 3 000 m 地区占到 0.15%,平均年潜在蒸发量 1 112.3 mm,海拔小于 3 000 m 且大于 1 500 m 的区域占到 23.66%,平均年潜在蒸发量 1 108.5 mm,海拔小于 1 500 m 且大于 1 000 m 的区域占到 23.55%,平均年潜在蒸发量 1 203.9 mm,海拔小于 1 000 m 的区域占到 52.50%,平均年潜在蒸发量 1 230.5 mm。局部观察,流域的东部平原地区还表现出明显的纬度差异性(图2),潜在蒸发量自北向南逐渐降低,共降低 82 mm。渭河关中段是黄土高原南缘的断层陷落盆地,具有明显的相对封闭的环境构架,北部的北山地区与南部秦岭为渭河关中段的天然屏障,天然屏障缓冲了东南季风和西北季风的影响。这种独特的地理环境通过影响降水、气温、风速等气候因素影响蒸发量^[23],流域内灌溉等农业活动也间接的影响蒸发量的大小与空间分布^[4]。

在观测的 11 个站点中,潜在蒸发量大多集中在 4~8 月份,包括夏季的全部和春末秋初,潜在蒸发量的峰值大多集中于 5、6 两个月份,一般在 6 月可以达到顶峰,有些站点会提前出现,其中 36% 发生于 5 月份,64% 发生于 6 月份。这一阶段的潜在蒸发量占到全年潜在蒸发量的 40% 左右。图 3 为潜在蒸发量分布的曲线拟合,可以看出年潜在蒸发量呈现正态分布的特征,并且呈现出显著的季节性特征,在 4~8 月份集中 1 a 当中最大的日潜在蒸发量与最多的潜在蒸发量。

3.2 潜在蒸发量的季节性分布特征分析

季节性是蒸发量变化的一大特点。在空间分布上,各个季节的潜在蒸发量与年潜在蒸发量的分布规律一致。渭河流域关中段年平均潜在蒸发

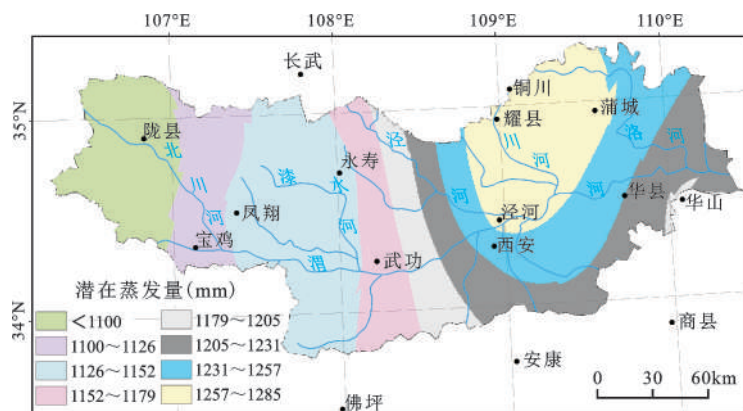


图2 1955~2012年渭河关中段平均年潜在蒸发量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual potential evapotranspiration in Weihe Basin in 1955-2012

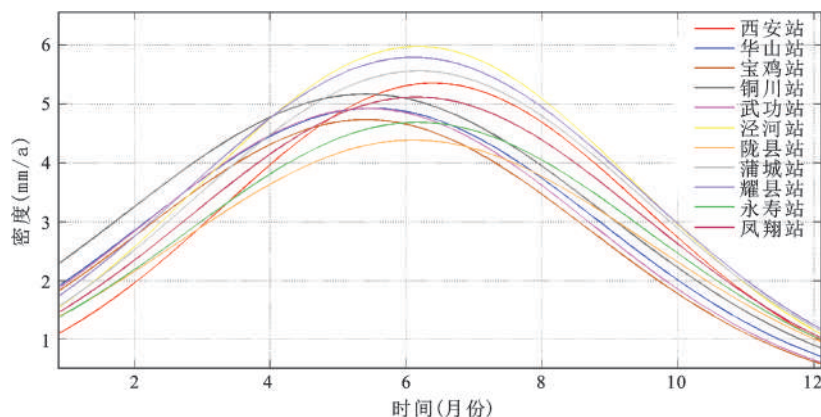


图3 渭河关中段季节性分布的潜在蒸发量

Fig. 3 Plots of the seasonal distributions of potential evapotranspiration

量在 1 072~1 285 mm 之间,春季在 195.6~327 mm 之间,占到年潜在蒸发量的 19%~22%;夏季在 327.6~547.2 mm 之间,占到年潜在蒸发量的 34%~42%;秋季在 250.8~466.2 mm 之间,占到年潜在蒸发量的 24%~33%;冬季在 115.2~247.8 mm 之间,占到年潜在蒸发量的 10%~18%。总的情势为夏季所占比例最大,冬季最小,中间依次为秋季、春季。

渭河关中断的年潜在蒸发量的年际变化倾向率为 $-9.16 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (图4),表明在全球温度升高的大背景下,研究区的潜在蒸发量总体上呈下降趋势,1980 年之前的下降幅度较为明显,1980 年之后呈现出上升的趋势。春、夏、秋、冬四季的线性倾向率分别为 3.28 、 -2.91 、 -7.59 、 $-1.94 \text{ mm}/10 \text{ a}$,除春季呈现增加趋势外,其余季节与年潜在蒸发量的变化趋势一致,都呈现下降的趋势。在对年及季节进行 M-K 趋势检验时发现,夏季与年潜在蒸发量的变化趋势十分吻合,都呈现下降趋势,都在 1973 年出现潜在蒸发量由增加到降低的突变,这说明夏季的潜在蒸发量对全年起到主导作用。

4 潜在蒸发量变化的成因分析

4.1 “蒸发悖论”的探讨

全球变暖已经成为不争的事实,研究表明过去 100 a 间,地球表面的升温速率为 $0.074^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ^[26],中国地表温度上升速率为 $0.08^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,略高于 20 世纪全球平均增温速率^[27]。温度是影响大气中的水汽含量和大气环流速率的主要因素,因此,随着温度升高,会加速近地表空气中水汽分子运动速度,照此推断,潜在蒸发量应该随温度上升而增加。尽管近 50 a 年全球温度普遍上升,但众多研究表

明全球范围内实测蒸发皿蒸发量和计算的潜在蒸发量都呈现下降趋势^[17,18,28,29]。Roderick 等^[30]将全球气温上升而潜在蒸发量减少的水文气象现象称为“蒸发悖论”。

总的来看,1955~2012 年潜在蒸发量呈现降低的趋势,线性倾向率为 $9.16 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。然而,相应时间序列内的平均气温却呈现出增加的趋势,线性倾向率为 $0.39^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,渭河关中段也存在学者们广泛关注的“蒸发悖论”现象,即随着气温的上升,蒸发量反而减少,这一结论也在相关研究中得到印证^[31]。经过 M-K 检验发现,潜在蒸发量在 1973、1992 年出现突变,分别以 1973 和 1992 年为分界点划分 3 个不同的时段:1955~1973、1974~1992 和 1993~2012 年。1955~1973 年呈增加趋势,线性倾向率为 $14.67 \text{ mm}/10 \text{ a}$,1974~1992 年呈显著减少趋势,线性倾向率为 $78.88 \text{ mm}/10 \text{ a}$,1993~2012 年呈微弱减少趋势,线性倾向率为 $6.90 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。同样的在 3 个时期,气温也有或增或减的现象,在第 1 个时期,气温呈增加趋势,线性倾向率为 $0.52^\circ\text{C}/10 \text{ a}$;第 2 个时期,气温呈微弱增加趋势,线性倾向率为 $0.05^\circ\text{C}/10 \text{ a}$;第 3 个时期,气温仍然呈现增加趋势,线性倾向率为 $1.14^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ (表 2)。也就是说,在分时间段的区间里面,1974~1992 和 1993~2012 年和整个时间序列一样,存在“蒸发悖论”的现象。

然而并非所有地区和时段都存在“蒸发悖论”的情况,研究区内,在划分时间段分站点统计的过程中,有 26.67% 存在“蒸发悖论”的情况,总的时间序列中,60% 的站点存在“蒸发悖论”的现象。

4.2 多气象要素的分析

潜在蒸发量受多种气象要素的影响,各要素之

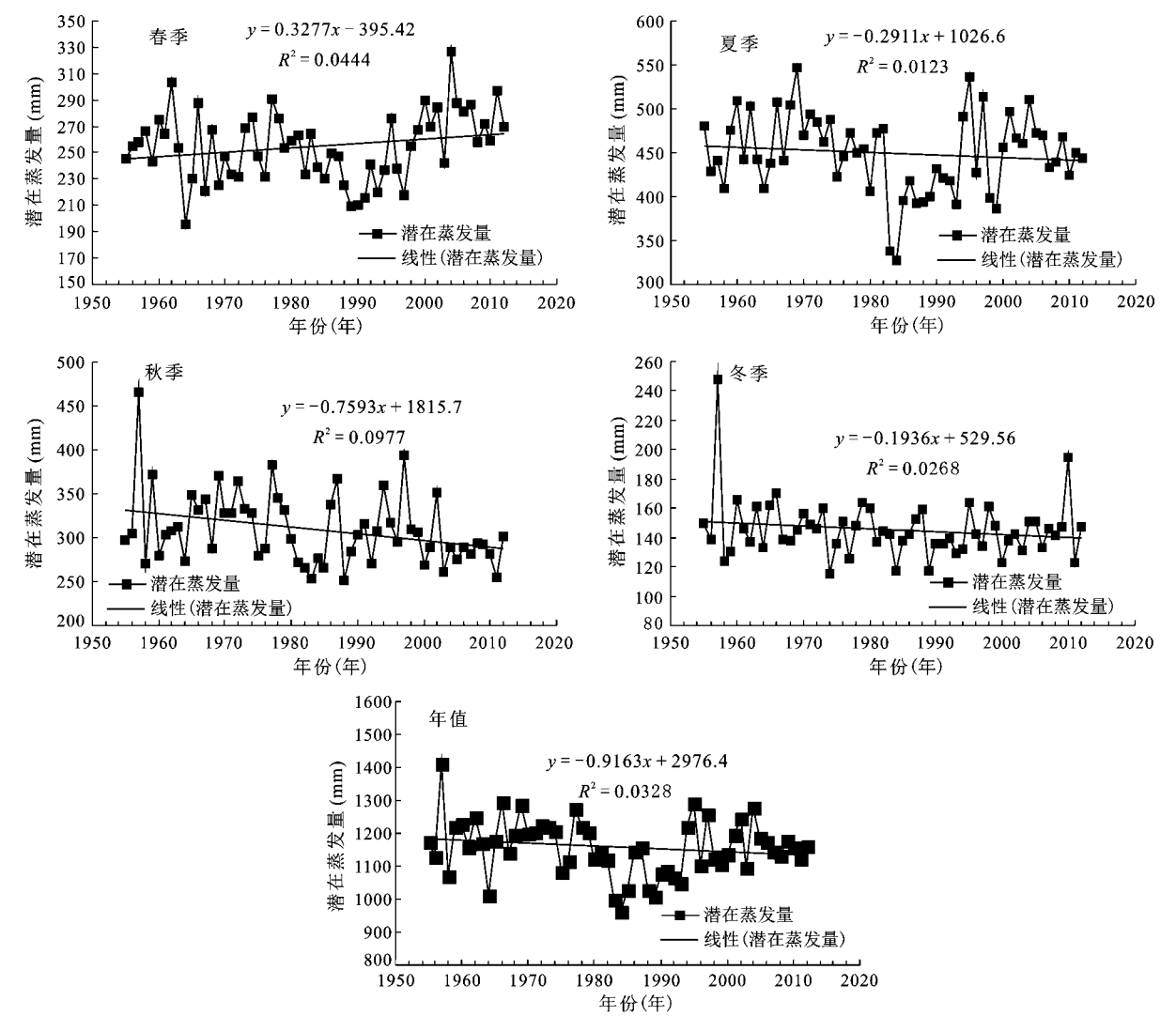


图4 渭河关中段年潜在蒸发量及季节潜在蒸发量变化趋势

Fig. 4 The annul and seasonal distributions of potential evapotranspiration in study area

表2 主要代表站点不同时段潜在蒸发量和气温变化趋势

Table 2 Change trend of ET0 and temperature in different periods

时间段(年)	潜在蒸发量(mm/10 a)					气温(℃/10 a)				
	西安	华山	宝鸡	铜川	武功	西安	华山	宝鸡	铜川	武功
1955~1973	67.53	-66.63	27.84	96.37	83.32	0.52	-0.02	0.03	0.31	0.11
1974~1992	-86.05	-119.79	2.79	-66	-119.79	0.01	-0.01	0.13	-0.09	0.10
1993~2012	87.11	-78.54	48.95	-13.49	-78.54	1.02	0.57	0.94	1.28	-0.10
1955~2012	-13.52	-53.08	25.08	28.88	-33.17	3.73	0.23	0.24	0.34	0.21

间相互影响,相互作用机理复杂,可以单一或者多个要素同时对潜在蒸发量产生影响,潜在蒸发量对各气象要素敏感的程度也不一样,选取同时间段的气象指标来研究潜在蒸发量与各种气象要素的相关性。选取的指标有:平均气温、气温日较差、降水量、相对湿度、平均风速、水汽压和日照时数。

从潜在蒸发与各气象要素的线性趋势来看,除平均气温外,其余气象要素(气温日较差、降水量、相对湿度、平均风速、水汽压和日照时数)均与潜在蒸发量一样,呈现减少的趋势,减少速度为分别为0.32℃/10 a、13.37 mm/10 a、0.02 m³/(g·10 a)、0.15 s/(m·10 a)、0.07 hPa/10 a、0.29 h/10 a(图5)。

再通过相关分析和回归分析来研究各气象要素对潜在蒸发量的影响(表3)。

从潜在蒸发量与气象要素的多元回归系数来看,潜在蒸发量与日较差、平均气温、平均风速、日照时数呈正相关关系,而与相对湿度和水汽压呈负相关关系,也就是说,随着日较差增大、平均气温上升、风速和日照时数的增加,都会引起潜在蒸发量的上升,而相对湿度和水汽压的加大会导致潜在蒸发量的下降。除平均气温和降水量以外的各个气象要素均达到了0.01以上的显著水平,可

以看出全年尺度上,各个气象要素的影响程度依次为平均风速>日照时数>日较差>水汽压>相对湿度>降水量>平均气温。可见平均风速和日照时数是影响渭河关中段潜在蒸发量的最主要因素,1955~2012年平均风速和日照时数都呈现下降的趋势,这也是造成研究区出现“蒸发悖论”的主要原因。季节尺度上并不同于全年的情况,在春季日较差和平均风速是影响潜在蒸发量的主导因子;夏季主要是平均风速和降水量;秋季主要是平均风速和平均气温;冬季主要是相对湿度和日较差。

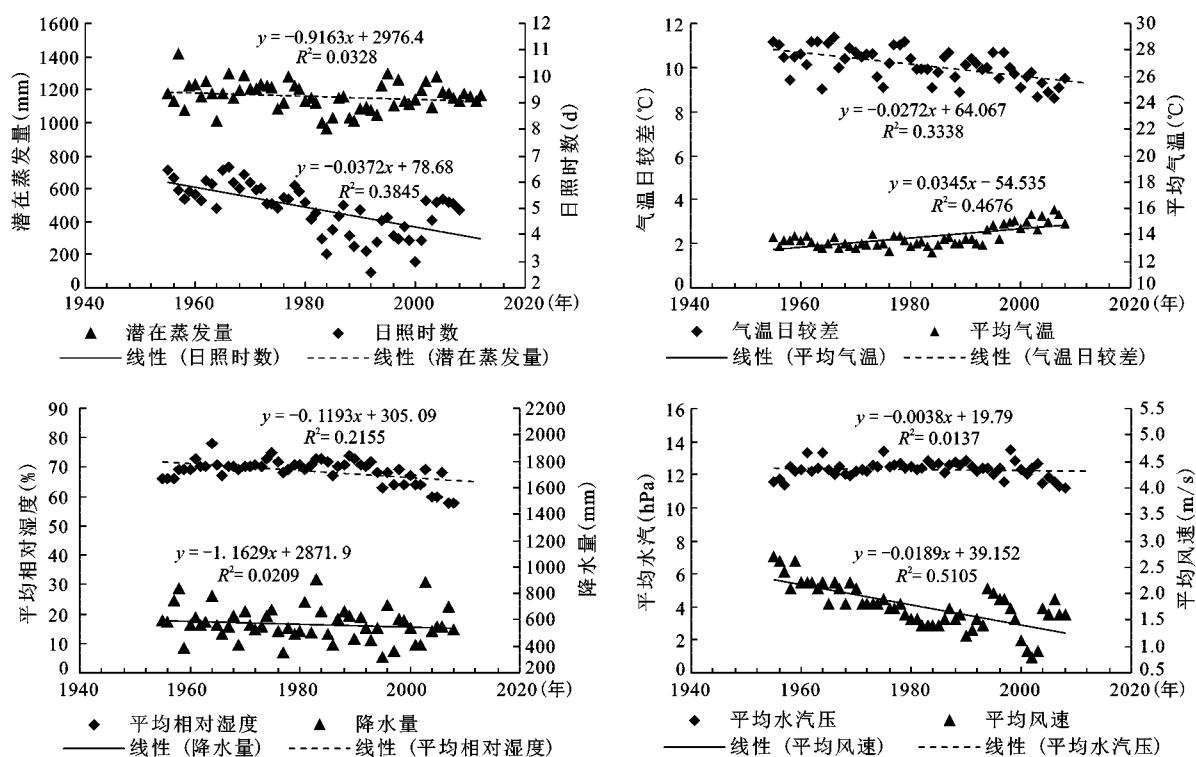


图5 1955~2012年气象因子及潜在蒸发量年际变化趋势

Fig.5 Interannual changing trend of the meteorological factors and potential evapotranspiration in 1955-2012

表3 渭河关中段年及季节潜在蒸发量与气象要素的多元回归系数

Table 3 Multivariate regression coefficients between climate factors and the annual and seasonal potential evaporation

气象要素	日较差(°C)	平均气温(°C)	降水量(mm)	相对湿度(%)	平均风速(m/s)	水汽压(hPa)	日照时数(h)
全年	0.522**	0.169	-0.265	-0.434**	0.791**	-0.501**	0.725**
春季	0.719**	-0.151	-0.291	-0.454**	0.698**	-0.643**	0.396**
夏季	0.648**	0.162	-0.672**	-0.590**	0.812**	-0.441**	0.481**
秋季	0.332*	0.597**	0.126	-0.235	-0.760**	-0.537**	-0.469**
冬季	0.582**	-0.134	-0.211	-0.792**	0.637**	-0.109	0.393**

注:**在0.01水平(双侧)上显著相关; *在0.05水平(双侧)上显著相关。

5 结 论

1) 渭河流域关中段年平均潜在蒸发量在 1 073.9~1 284.1 mm, 流域内的多年平均蒸发量随着海拔的降低而逐渐增高。

2) 春季的潜在蒸发量在 195.6~327 mm, 占全年的 19%~22%; 夏季在 327.6~547.2 mm, 占全年的 34%~42%; 秋季在 250.8~466.2 mm, 占全年的 24%~33%; 冬季的年潜在蒸发量在 115.2~247.8 mm, 占全年的 10%~18%。夏季与年潜在蒸发量的变化趋势以及发生突变的年份都高度一致, 说明夏季的潜在蒸发量对全年起到主导作用。

3) 渭河关中段存在“蒸发悖论”现象, 随着气温的上升, 潜在蒸发量反而减少。1955~2012年潜在蒸发量呈现降低的趋势, 线性倾向率为 $-9.16 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 相应时段的平均气温呈现增加的趋势, 线性倾向率为 $0.39 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 。

4) 年均潜在蒸发量与日较差、平均气温、平均风速、日照时数呈正相关关系, 与相对湿度和水汽压呈负相关关系, 平均风速和日照时数是主导因素。

参考文献:

- [1] Mir A Matin, Charles P-A Bourque. Assessing spatiotemporal variation in actual evapotranspiration for semi-arid watersheds in northwest China: Evaluation of two complementary-based methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **486**: 455-465.
- [2] 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[J]. *地理学报*, 2011, **66**(5): 579~588.
- [3] 韩松俊, 胡和平, 杨大文, 等. 塔里木河流域山区和绿洲潜在蒸散发的不同变化及影响因素[J]. *中国科学(E辑: 技术科学)*, 2009, **39**(8): 1375~1383.
- [4] 韩松俊, 王少丽, 杨大文. 农业活动对中国区域“蒸发悖论”规律的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, **26**(10): 1~8.
- [5] Mckenney M S, Rosenberg N J. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change[J]. *Agric For Meteorol*, 1993, **64**(1-2): 81-110.
- [6] 李 斌, 李丽娟, 覃驭楚, 等. 澜沧江流域潜在蒸散发敏感性分析[J]. *资源科学*, 2011, **33**(7): 1256~1263.
- [7] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. *地理科学*, 2013, **33**(4): 457~464.
- [8] 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.
- [9] Liang L Q, Li L J, Liu Q. Spatio-temporal variations of reference crop evapotranspiration and pan evaporation in the West Songnen Plain of China[J]. *Hydrological Sciences*, 2011, **56**(7): 1300-1313.
- [10] 蒋 冲, 王 飞, 刘思洁, 等. “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨[J]. *生态学报*, 2013, **33**(3): 844~855.
- [11] 张 东, 张万昌, 徐全芝. 汉江上游流域蒸散量计算方法的比较及改进[J]. *资源科学*, 2005, **27**(1): 97~103.
- [12] Gao G, Xu C Y, Chen D L, et al. Spatial and temporal characteristics of actual evapotranspiration over Haihe River basin in China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, **26**(5): 655-669.
- [13] Liu X M, Zheng H X, Zhang M H, et al. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, **21**(4): 594-608.
- [14] 马雪宁, 张明军, 王圣杰, 等. “蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J]. *地理学报*, 2012, **67**(5): 645~656.
- [15] Li Z, Zheng F L, Liu W Z. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961-2009 and its projected changes during 2011-2099 on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **154-155**: 147-155.
- [16] Qiang Liu, Zhifeng Yang. Trends for pan evaporation during 1959-2000 in China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 1934-1941.
- [17] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent And future climate change[J]. *Agric For Meteorol*, 1997, **87**(1): 55-73.
- [18] Cohen S, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet-Dagan Israel, 1964-1998[J]. *Agric For Meteorol*, 2002, **111**(2): 83-91.
- [19] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial Near-surface wind speeds: Implications for evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **416-417**: 182-205.
- [20] 郭元喜, 龚道溢, 汪文珊, 等. 中国东部夏季云量与日气温统计关系[J]. *地理科学*, 2013, **33**(1): 104~109.
- [21] 施国萍, 邱新法, 曾 燕. 中国三种太阳辐射起始数据分布式模拟[J]. *地理科学*, 2013, **33**(4): 385~392.
- [22] Wang W G, Shao Q X, Peng S Z, et al. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957-2008 and their spatial and seasonal differences[J]. *Water Resources Research*, 2012, **48**: 27-35.
- [23] 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.
- [24] 吴秀芹, 张洪岩, 李瑞改, 等. ArcGIS9 地理信息系统应用与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [25] 蒋 冲, 王 飞, 刘焱序, 等. 秦岭南北风速时空变化及突变特征分析[J]. *地理科学*, 2013, **33**(2): 244~250.
- [26] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment[M]. New York: Cambridge University Press, 2007: 10.
- [27] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. *气候与环境研究*, 2005, **10**(4): 791~798.
- [28] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. *Nature*, 1995, **377**: 687-688.
- [29] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evap-

- oration paradox[J]. *Nature*, 1998, **396**: 29-30
- [30] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 2002, **298**(15): 1410-1411.
- [31] Depeng Zuo, Zongxue Xu, Hong Yang, et al. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26**: 1149-1160.

Spatial and Temporal Change of the Potential Evapotranspiration in Weihe River Basin: A Case Study in Guanzhong Area

LIU Wen, CAO Ming-ming, QIU Hai-jun, GUO Shuai, LI Ran

(School of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: Based on the daily data of 11 meteorological stations of Guanzhong area in Weihe River Basin in 1960-2006 and combined with the FAO Penman-Monteith model, spatial and temporal changes of potential evaporation were quantitatively analyzed in this study, which mainly discussed the reason of the decreasing of potential evaporation. It was showed that potential evapotranspiration in Guanzhong area of Weihe River Basin decreased significantly with the increasing of mean temperature, which is mainly because mean wind speed and sunshine time decreased significantly. The main results are as follows: 1) The annual potential evapotranspiration, gradually increased with the loss of the altitude, which range from 1 073.9 mm to 1 284.1 mm. 2) The potential evapotranspiration in spring range from 195.6 mm to 327 mm, accounted for about 19%-22% of the year, and the potential evapotranspiration in summer range from 327.6 mm to 547.2 mm, accounted for about 34%-42% of the year, which plays a leading role throughout the year. The potential evapotranspiration in autumn and winter is in 250.8-466.2 mm and 115.2-247.8 mm respectively, accounted for 24%-33% and 10%-18%. 3) The evaporation paradox actually existed in the study area, as the mean temperature increased, the potential evapotranspiration generally decreased. Linear trend rate of the potential evapotranspiration is $-9.16 \text{ mm}/10 \text{ a}$ during 1955 to 2012, however, at the same time, linear trend rate of the mean temperature is $0.39^\circ\text{C}/10 \text{ a}$. 4) Mean annual potential evapotranspiration and the diurnal range, mean temperature, mean wind speed and sunshine duration were positively correlated, and negatively correlated with relative humidity and water vapor pressure. The mean wind speed and sunshine time is the dominating factor leading to the decrease of potential evapotranspiration in the study area.

Key words: potential evapotranspiration; FAO Penman-Monteith model; Guanzhong area of Weihe River Basin