

引用格式:郭梦瑶,余敦先,张利平,等.渭河流域潜在蒸散量变化的气候归因[J].资源科学,2020,42(5):907-919.[Guo M Y, She D X, Zhang L P, et al. Climate explanation of the potential evapotranspiration changes in Weihe River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 907-919.] DOI: 10.18402/resci.2020.05.09

渭河流域潜在蒸散量变化的气候归因

郭梦瑶¹,余敦先^{1,2},张利平^{1,2,3},汤柔馨¹,赵鹏雁¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072;

2. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室,武汉 430072;

3. 黄冈师范学院旅游与地理科学学院,黄冈 438000)

摘要:潜在蒸散量的变化及其归因分析是认识水文过程及其对气候变化响应的重要途径。本文利用FAO Penman-Monteith公式估算渭河流域1960—2016年的潜在蒸散量,并通过敏感性分析和基于全微分法的贡献评估,定量研究气象因子(太阳辐射、风速、相对湿度、平均气温)的变化对潜在蒸散量变化的影响。结果表明:①近57年来,年潜在蒸散量呈轻微增长趋势(0.239 mm/a),多年平均潜在蒸散量在流域上的空间分布特点为东高西低,北高南低,自东北向西南递减;②年潜在蒸散量对气象因子变化的敏感性高低顺序为相对湿度>太阳辐射>平均气温>风速,其中对气温和风速的敏感性会随着海拔的升高而降低;③气象因子变化对年潜在蒸散量变化的贡献大小顺序为平均气温>风速>相对湿度>太阳辐射,太阳辐射和风速的下降对年潜在蒸散量变化的负效应被平均气温升高和相对湿度减小对其的正效应所抵消,最终使得渭河流域年潜在蒸散量在1960—2016年呈微弱增加趋势。研究还发现,气象因子之间的相关性可能会影响它们对于潜在蒸散量变化的独立贡献,实际情况下,可以在考虑各因子相互作用的前提下对潜在蒸散量的归因给予充分讨论。本文结果对于理解气候变化对水循环的影响机理和加强区域应对气候变化的能力有一定意义。

关键词:潜在蒸散量;气候变化;气象因子;敏感性系数;全微分法;归因分析;渭河流域

DOI :10.18402/resci.2020.05.09

1 引言

蒸散发是水文循环的一个关键环节,也是全球能量交换的重要组成部分^[1,2]。影响蒸散量的因素有很多,如气象条件、土地覆盖、作物特点、土壤状况等^[3,4]。实际工作中,由于资料匮乏或观测条件有限,往往难以得到准确的蒸散量,一般依据潜在蒸散量来研究蒸散量的变化规律^[5]。潜在蒸散量又称可能蒸散量或蒸散发能力,它指下垫面在足够湿润条件下能够供应的最大蒸散量^[6]。

在全球气候变化背景下,开展蒸散量变化的气候归因分析,对于加深气候变化对水文循环过程影响机理的认识与加强区域应对气候变化的能力有

重要意义,也是国内外水文气象领域的研究热点之一^[7]。Martin等^[8]和Goyal^[9]对气象因子与蒸散量进行相关分析与回归分析,探究蒸散量对单一或多个气象因子变化的响应规律,从而阐释引起蒸散量变化的气候原因;McCuen^[10]定义了蒸散量对气象因子的相对敏感性,利用相对敏感性系数(以下简称“敏感性系数”)定量估算蒸散量对各气象因子变化的响应程度,从而对蒸散量变化进行气候归因。依据敏感性系数分析气候变量对蒸散量的影响简单有效,已被学者们广泛应用于蒸散模型的研究中^[11-14]。然而,该方法是基于控制变量的思想探究蒸散量对某单一气象因子变化的敏感程度,不能反映多个气

收稿日期:2018-11-19;修订日期:2019-06-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41877159);国家重点研发计划项目(2017YFA0603704)。

作者简介:郭梦瑶,女,陕西汉中,博士研究生,主要从事气候变化和水文模拟研究。E-mail: mengyao_guo@whu.edu.cn

通讯作者:余敦先,男,安徽芜湖人,副教授,主要从事水文水资源研究。E-mail: shedunxian@whu.edu.cn

象因子对蒸散量的综合影响,也无法定量刻画气象因子变化对蒸散量变化的实际贡献^[15]。Roderick等^[16]在对澳大利亚1975—2004年蒸发皿蒸发量的变化进行归因分析时,提出了全微分法,该方法能够综合考虑各气象因子对蒸发量的影响,物理机制较为清晰,可定量评估气象因子变化对蒸发量变化的贡献,已被应用于许多地区^[17-19]。在当前的归因研究中,为全面理解气象因子变化对潜在蒸散量变化的影响,往往结合应用敏感性系数分析和基于全微分的贡献评估,对这两种方法的结果进行综合讨论^[20,21]。

渭河是黄河最大的支流,地处中国西北地区东部生态环境脆弱带,是气候变化的敏感区^[22]。渭河流域大部分地区位于关中—天水经济区内,在整个黄河流域乃至中国西部地区的水资源开发管理和社会经济发展中占据重要位置。已有学者开展了一系列有关渭河流域潜在蒸散量的研究,如左德鹏等^[23]利用Hargreaves模型估算渭河流域潜在蒸散量,并预测其在未来气候变化情景下的趋势;蒋冲等^[24]基于渭河流域潜在蒸散量计算湿润指数,分析流域内湿润指数的时空变化特征;雷江群等^[25]为研究渭河流域的干湿状况分布,计算流域内各气象站点的潜在蒸散量并分析其时空变化规律。但是,上述研究仅关注渭河流域潜在蒸散量的时空变化,尚缺乏对于这种变化的归因分析。本文基于渭河流域28个国家基本气象站1960—2016年的日观测数据,利用FAO Penman-Monteith公式估算潜在蒸散量,并通过敏感性系数分析和基于全微分法的贡献评估,定量研究不同时间尺度上气象因子的变化对潜在蒸散量变化的影响,从气候变化的角度阐释渭河流域潜在蒸散量变化的原因。本文研究结果可为渭河流域应对气候变化,合理开发利用水资源,防灾减灾,促进社会经济可持续发展等提供科学决策依据。

2 研究区概况

渭河是黄河最大的一级支流,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,主要流经天水、宝鸡、咸阳、西安、渭南等地,至陕西省潼关县汇入黄河^[26]。渭河流域(图1)位于103°58'E—110°17'E,33°42'N—37°24'N,总面积约13.48万km²,地貌以黄土高原和关中盆地为

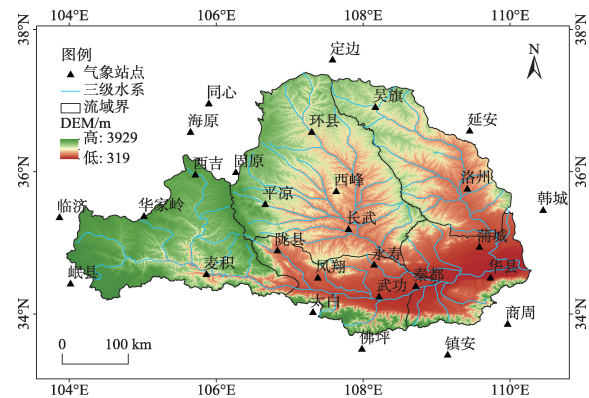


图1 渭河流域位置和气象站点分布

Figure 1 Location of the Weihe River Basin and distribution of meteorological stations

主,地势西高东低,高程范围约319~3929 m,起伏较大;流域地处中国干旱区和湿润区的过渡地带,属大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,多年平均气温7.8~13.5℃,多年平均降雨量500~800 mm^[27];流域干流全长818 km,水系呈扇型分布,主要有泾河、北洛河两大支流,其中泾河是渭河最大支流;流域内主要土壤类型为黄褐土、褐土、黄壤和棕壤,主要植被类型为落叶阔叶林^[28]。

3 数据与方法

3.1 数据来源

本文所用数据主要为渭河流域28个国家基本气象站(图1)1960—2016年的逐日气象观测资料,包括平均风速、最高最低气温、平均相对湿度、日照时数、平均气压。上述数据来源于中国气象数据网,并通过了均一性检验。本文对季节时间尺度的划分如下:3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12—翌年2月为冬季。

3.2 研究方法

3.2.1 潜在蒸散量估算

本文采用由联合国粮农组织(FAO)推荐的FAO Penman-Monteith公式^[4]估算潜在蒸散量,该方法已在世界范围内广泛应用^[9,11,12,29],计算公式如下:

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

式中: ET_0 为潜在蒸散量(mm/d); Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/℃); R_n 为地表净辐射(MJ/m²d); G 为土壤热通量(MJ/m²d); γ 为干湿表常数(kPa/℃);

2020年5月

T 为 2 m 高处日平均气温($^{\circ}\text{C}$); u_2 为 2 m 高处风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa)。以上参数都可根据气象台站的观测资料计算得到,如下:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (2)$$

式中: T_{\max} 、 T_{\min} 分别为日最高、最低气温($^{\circ}\text{C}$)。

$$\gamma = \frac{CP}{\varepsilon\lambda} \quad (3)$$

式中: C 为空气定压比热,其值为 $C=1.013 \times 10^3$ MJ/kg $^{\circ}\text{C}$; P 为平均气压(kPa); ε 为水与空气的分子量之比,其值为 $\varepsilon=0.622$; λ 为蒸发潜热,其值为 $\lambda=2.45$ MJ/kg。

$$e_s = 0.6108 \times \exp\left[\frac{17.27T}{T+237.3}\right] \quad (4)$$

$$e_a = RH \times e_s \quad (5)$$

式中: RH 为平均相对湿度(%)。

$$\Delta = \frac{4098 \times e_s}{(T+237.3)^2} \quad (6)$$

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (7)$$

式中: u_z 为 z 米高处测量的风速(m/s); z 为风速计仪器安放的离地面高度(m),在本文 $z=10$ m。根据文献^[4],土壤热通量 G 相对非常小,可忽略不计,即取 $G \approx 0$ 。地表净辐射 R_n 是太阳辐射 R_s 的函数, R_s 由下式计算:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a \quad (8)$$

式中: R_s 为太阳辐射(MJ/m 2 d); n 为实际日照时数(h); N 为最大可能日照时数(h); R_a 为地球外辐射(MJ/m 2 d); a_s 和 b_s 为经验系数,根据文献^[6],本文取 $a_s=0.25$, $b_s=0.50$ 。

3.2.2 线性趋势分析

线性趋势分析方法常用于检测水文气象要素序列的变化趋势,它基于最小二乘法拟合变量的线性趋势线,依据趋势线斜率分析序列变化趋势。趋势线斜率为正(负)说明序列呈增加(减少)趋势,且斜率的绝对值越大表明序列的变化率越大^[30]。采用相关系数(R)检验法判别趋势的显著性,通过查阅 R 的临界值表,可以判定水文气象要素序列变化趋势的显著性水平^[31]。

3.2.3 敏感性分析

敏感性可定量反映气象因子的相对变化对潜在蒸散量相对变化的影响程度,本文利用 McCuen^[10] 定义的敏感性系数,分析渭河流域潜在蒸散量对气象因子的敏感性,计算公式如下:

$$S(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta x / x} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial x} \cdot \frac{x}{ET_0} \quad (9)$$

式中: $S(x)$ 为潜在蒸散量对气象因子 x 的敏感性系数。敏感性系数绝对值越大表明气象因子的相对变化对潜在蒸散量相对变化的影响越大。例如:若 $S(x)$ 为 0.1,表明假定其他变量保持不变,当气象因子 x 增加 10% 时潜在蒸散量将增加 1%;若 $S(x)$ 为 -0.2,表明假定其他变量保持不变,当气象因子 x 增加 10% 时潜在蒸散量将减少 2%。

为评估敏感性程度,根据 $S(x)$ 绝对值大小将敏感性分为 4 个等级^[32],如表 1 所示。

3.2.4 基于全微分法的气象因子变化对潜在蒸散量变化的贡献评估

本文利用 Roderick 等^[16]提出的全微分法,定量评估各气象因子的变化对潜在蒸散量变化的贡献。设潜在蒸散量的函数模型为 $ET_0 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$,其中 x_1, x_2, \dots, x_n 为各气象因子变量,利用 Taylor 展开,可将 ET_0 的变化表示为:

$$dET_0 = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n + \delta \quad (10)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散量; $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为气象因子变量; δ 为高阶误差项。

上式成立的前提是气象因子变量相互独立,而实际上各气象因子间相互影响,并不完全独立,这给归因分析带来较大的不确定性。因此,在选择气象因子时,既要考虑其对潜在蒸散量的影响,也要考虑它们之间的关系。如, Roderick 等^[16]将蒸发皿蒸发率分为辐射项和空气动力学项,通过求导将空

表 1 敏感性等级表

Table 1 Classification of sensitivity coefficient	
敏感性系数 S	敏感性等级
$0.00 < S < 0.05$	敏感性很小,可忽略不计
$0.05 \leq S < 0.20$	中度敏感
$0.20 \leq S < 1.00$	高度敏感
$ S \geq 1.00$	极度敏感

气动力学项的变化细划为风速、水汽压差、平均气温的贡献,并结合辐射项的贡献,对蒸发皿蒸发量的变化进行归因分析;Zheng等^[17]基于FAO Penman-Monteith公式将蒸发量的变化近似为太阳辐射、平均气温、风速、实际水汽压变化的贡献和。鉴于水汽压是气温的函数,为尽可能确保变量的独立性,本文参考张守红等^[33]的研究,将主要气象因子选为风速、相对湿度、平均气温和太阳辐射。进一步展开式(10),得到:

$$\frac{dET_0}{dt} = \frac{\partial ET_0}{\partial R_s} \frac{dR_s}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial u_2} \frac{du_2}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial RH} \frac{dRH}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \delta$$

$$= C(R_s) + C(u_2) + C(RH) + C(T) + \delta \quad (11)$$

式中: $\partial ET_0/\partial R_s$ 、 $\partial ET_0/\partial u_2$ 、 $\partial ET_0/\partial RH$ 、 $\partial ET_0/\partial T$

分别为潜在蒸散量对太阳辐射、风速、相对湿度、平均气温的偏导数; dET_0/dt 、 dR_s/dt 、 du_2/dt 、 dRH/dt 、 dT/dt 分别为潜在蒸散量和各气象因子的时间变化趋势; δ 为高阶误差项; $C(R_s)$ 、 $C(u_2)$ 、 $C(RH)$ 、 $C(T)$ 分别为太阳辐射、风速、相对湿度、平均气温的变化对潜在蒸散量变化的贡献量,该值为正(负)时,表明其对潜在蒸散量变化的贡献为正(负)效应。

4 结果与讨论

4.1 潜在蒸散量时空变化

4.1.1 潜在蒸散量时间变化

图2为渭河流域1960—2016年全年和各季潜

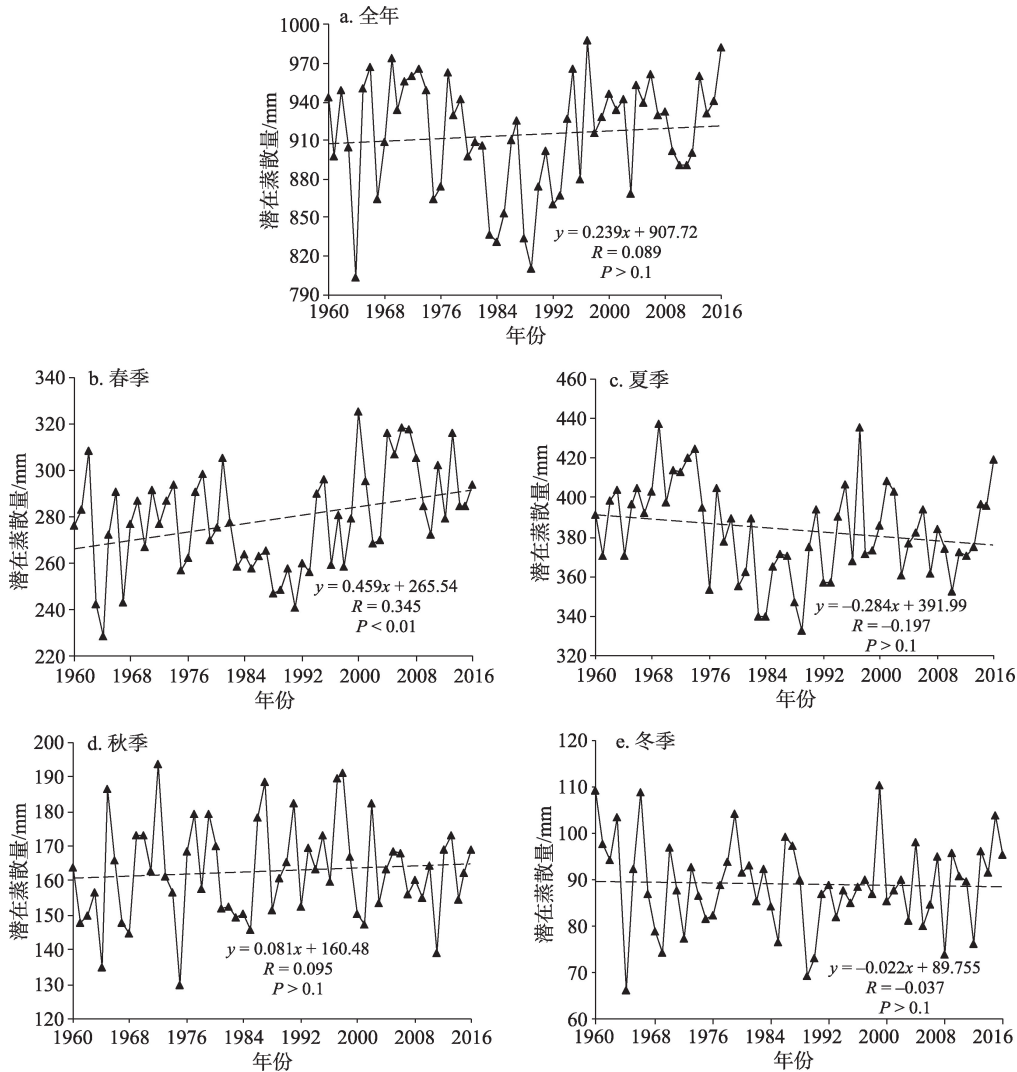


图2 1960—2016年渭河流域全年及各季潜在蒸散量的时间变化

Figure 2 Temporal change of annual and seasonal potential evapotranspiration in the Weihe River Basin, 1960-2016

2020年5月

在蒸散量的变化趋势。近57年来,年潜在蒸散量呈微弱增加趋势(0.239 mm/a),这与其他学者的研究结果基本一致^[6,26,34-37]。季尺度上,春季潜在蒸散量显著增加(0.459 mm/a, $P < 0.01$);夏季潜在蒸散量微弱下降(-0.284 mm/a);秋、冬季潜在蒸散量分别呈微弱上升(0.081 mm/a)与下降(-0.022 mm/a)趋势。潜在蒸散量在年尺度上的增加趋势在很大程度上源于其在春季的显著增加。

4.1.2 潜在蒸散量空间变化

利用ArcGIS 10.1软件,通过Kriging插值法将渭河流域28个站点1960—2016年的平均潜在蒸散

量插值至整个流域,得到其空间分布(图3)。近57年来,年均潜在蒸散量在渭河流域上大致呈现出东高西低、北高南低、从西南向东北递增的趋势(图3a);就插值前的流域内站点潜在蒸散量而言,最小值在西部的岷县站(792.06 mm),最大值在东南部的蒲城站(1072.1 mm)。季尺度上,四季平均潜在蒸散量的空间变化范围分别为246.383~329.288 mm、327.027~446.502 mm、150.622~184.694 mm和75.015~105.336 mm,春、夏季潜在蒸散量的空间变化特点与年潜在蒸散量类似;秋季,潜在蒸散量的南北差异不明显;冬季潜在蒸散量则呈现出由西北

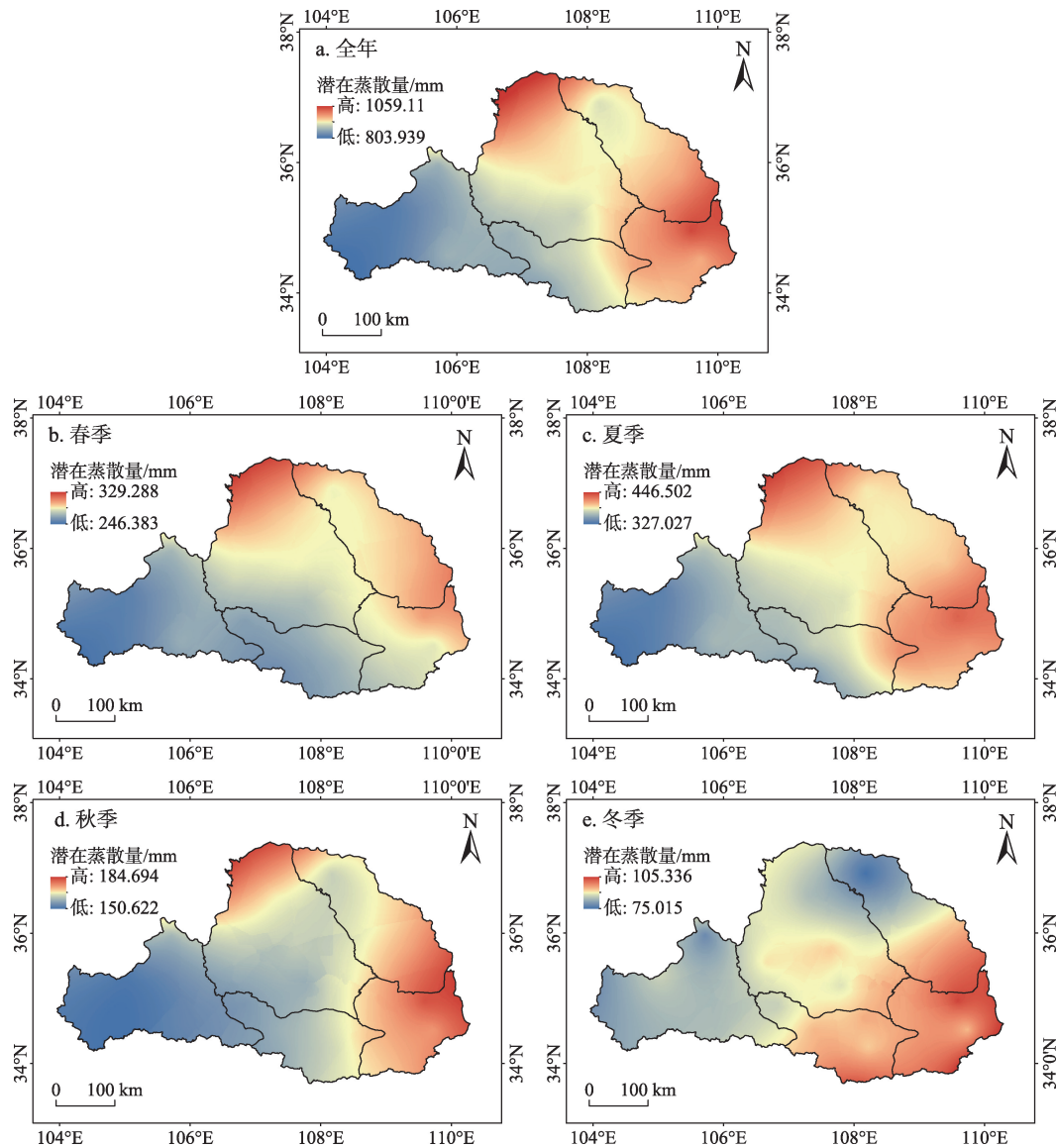


图3 1960—2016年渭河流域全年及各季平均潜在蒸散量的空间分布

Figure 3 Spatial distribution of average annual and seasonal potential evapotranspiration in the Weihe River Basin, 1960-2016

向东南增加的分布特征,而且于插值前的流域内站点而言,最小值在北部的吴旗站(70.281 mm),最大值在东南部的蒲城站(108.89 mm)。这些空间分布规律与左德鹏等^[26,35]的研究结果基本一致。值得注意的是,潜在蒸散量在东西方向上的分异在各时间尺度下都十分明显,原因可能是渭河流域东部地势低,气温高,潜在蒸散量大,而西部则反之。

4.2 气象因子时间变化趋势

渭河流域全年和各季的气象因子及潜在蒸散量在1960—2016年的年代际变化趋势见表2。近57年来,渭河流域年均太阳辐射呈微弱下降趋势,变化幅度为每10年减少0.04 MJ/m²,其中,夏季的下降幅度最大(-0.206 MJ/m², $P < 0.01$),秋季的下降幅度最小(-0.04 MJ/m², 不显著)。值得注意的是,太阳辐射只在春季呈显著上升趋势,且变化幅度为每10年增加0.163 MJ/m² ($P < 0.05$)。太阳辐射的下降在20世纪全球范围内广泛存在,被称为“全球变暗”^[38],主要由于不断增加的气溶胶及其他空气污染改变了大气的光学性质,从而影响太阳辐射^[39]。

平均风速在全年和各季均呈显著下降趋势($P < 0.01$),幅度分别为每10年下降0.062 m/s、0.076 m/s、0.050 m/s、0.052 m/s和0.072 m/s。近几十年来,渭河流域城市化进程不断推进、工业化逐步发

达、高层建筑日益增加等原因使地表糙率增加,从而使风速显著下降^[40];此外,为解决渭河流域的水土流失问题,中国自1999年起在流域及周边区域推行退耕还林(草)政策,故近年来地表植被覆盖率显著增加,亦使得地表糙率增加,引起风速下降^[41]。

年均相对湿度呈微弱下降趋势,幅度为每10年降低0.402%;季尺度上,相对湿度在春、秋季下降,在夏、冬季上升,且只在春季变化显著($P < 0.01$)。这与王亚俊等^[6]在黄河中上游流域的研究结果基本一致。

平均气温在全年和各季均呈显著上升趋势($P < 0.01$)。年均气温的变化率为每10年上升0.297°C;就各季而言,春、冬季的气温上升较快,夏季气温则上升较慢。这也与已有研究结果基本吻合^[42,43]。

值得注意的是,潜在蒸散量仅在春季显著增加的特点与相对湿度仅在春季显著减小的特点相一致,由此可以定性推断渭河流域相对湿度对潜在蒸散量的影响较大。相对湿度的减小(即饱和水汽压差增大)增强了蒸散发所需的驱动力,从而会增加潜在蒸散量^[44]。

4.3 敏感性分析

4.3.1 潜在蒸散量对气象因子的敏感性系数

根据计算得到表3中的各气象因子的敏感性系

表2 1960—2016年渭河流域全年及各季气象因子与潜在蒸散量的年代际变化率

Table 2 Decadal linear trend of annual and seasonal meteorological factors and potential evapotranspiration in the Weihe River Basin, 1960-2016

时间尺度	太阳辐射/(MJ/m ² /10a)	风速/(m/s/10a)	相对湿度/(%/10a)	平均气温/(°C/10a)	潜在蒸散量/(mm/10a)
全年	-0.04	-0.062**	-0.402	0.297**	2.387
春季	0.163*	-0.076**	-1.393**	0.361**	4.585**
夏季	-0.206**	-0.05**	0.028	0.191**	-2.838
秋季	-0.04	-0.052**	-0.384	0.297**	0.81
冬季	-0.075	-0.072**	0.13	0.323**	-0.216

注:*表示通过了0.05水平上的显著性检验,**表示通过了0.01水平上的显著性检验。

表3 1960—2016年渭河流域全年和各季潜在蒸散量对气象因子的敏感性系数

Table 3 Sensitivity coefficients of annual and seasonal potential evapotranspiration to meteorological factors in the Weihe River Basin, 1960-2016

时间尺度	太阳辐射	风速	相对湿度	平均气温
全年	0.446**	0.135*	-0.578**	0.263**
春季	0.515**	0.115*	-0.484**	0.324**
夏季	0.662**	0.078*	-0.435**	0.517**
秋季	0.427**	0.115*	-0.747**	0.309**
冬季	0.175*	0.234**	-0.651**	-0.105*

注:*表示中度敏感,**表示高度敏感。

2020年5月

数,渭河流域潜在蒸散量对所选气象因子的敏感性均较高,大多为高度敏感。年尺度上,潜在蒸散量对相对湿度的敏感性最高,其次为太阳辐射和平均气温,对风速的敏感性最低(中度敏感)。值得注意的是,潜在蒸散量对相对湿度的敏感性系数为负值,说明潜在蒸散量会随着相对湿度的增大而减小(若其他变量保持不变,当相对湿度增加10%时,年潜在蒸散量将减少5.78%;而当太阳辐射、风速、气温分别增加10%时,年潜在蒸散量将分别增加4.46%、1.35%、2.63%)。季尺度上,潜在蒸散量对平均气温和太阳辐射的敏感性在夏季最高而在冬季最低(中度敏感);对风速的敏感性则在冬季最高,在其他季节仅为中度敏感。值得注意的是,潜在蒸散量对相对湿度的变化在各时间尺度上均高度敏感,这与4.2小节末提到的渭河流域上相对湿度对潜在蒸散量的影响较大相一致。

4.3.2 敏感性系数与高程的关系

渭河流域地势起伏很大,为更全面地理解潜在

蒸散量变化的原因,有必要探究敏感性系数与高程之间的关系,分析高程对敏感性系数的影响。如图4所示,以年尺度为例,潜在蒸散量对风速的敏感性系数随着高程的增加而显著减小($P < 0.1$);潜在蒸散量对平均气温的敏感性系数也随着高程的增加而显著减小($P < 0.01$),且其与高程的相关性最高($R = -0.957$),这主要是由于气温随海拔升高而降低的线性关系;潜在蒸散量对太阳辐射和相对湿度的敏感性系数与高程无明显关系。潜在蒸散量对气象因子的敏感性与高程的关系反映出不同海拔的地形、植被、土壤和大气之间复杂的相互作用^[6]。

4.4 气象因子变化对潜在蒸散量变化的贡献评估

本文利用式(11)估算各气象因子对潜在蒸散量变化趋势的贡献,并将所有站点的实际潜在蒸散量变化率与估算的潜在蒸散量变化率(各气象因子对潜在蒸散量变化率的贡献总和)的散点图拟合如下(图5)。可以看出,这两者吻合得很好(拟合直线与 $y=x$ 十分相近),全年和四季的相关系数(R)分别

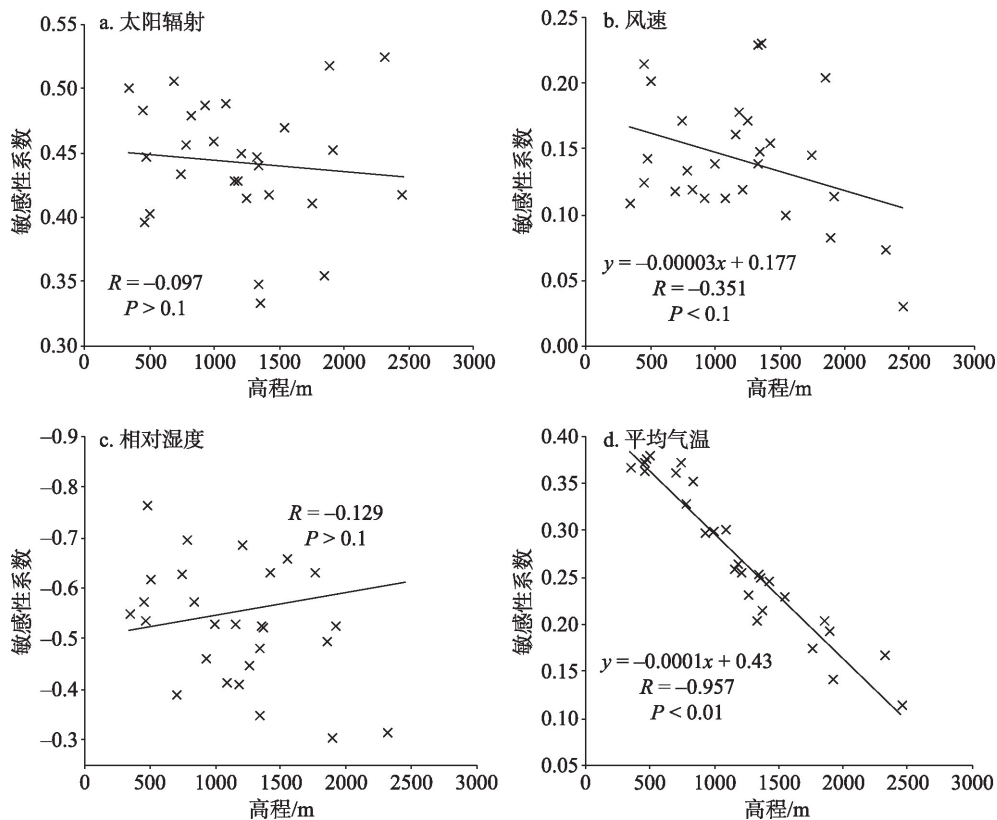


图4 1960—2016年渭河流域潜在蒸散量对气象因子的敏感性系数与高程的关系

Figure 4 Correlations between sensitivities and altitude in the Weihe River Basin, 1960-2016

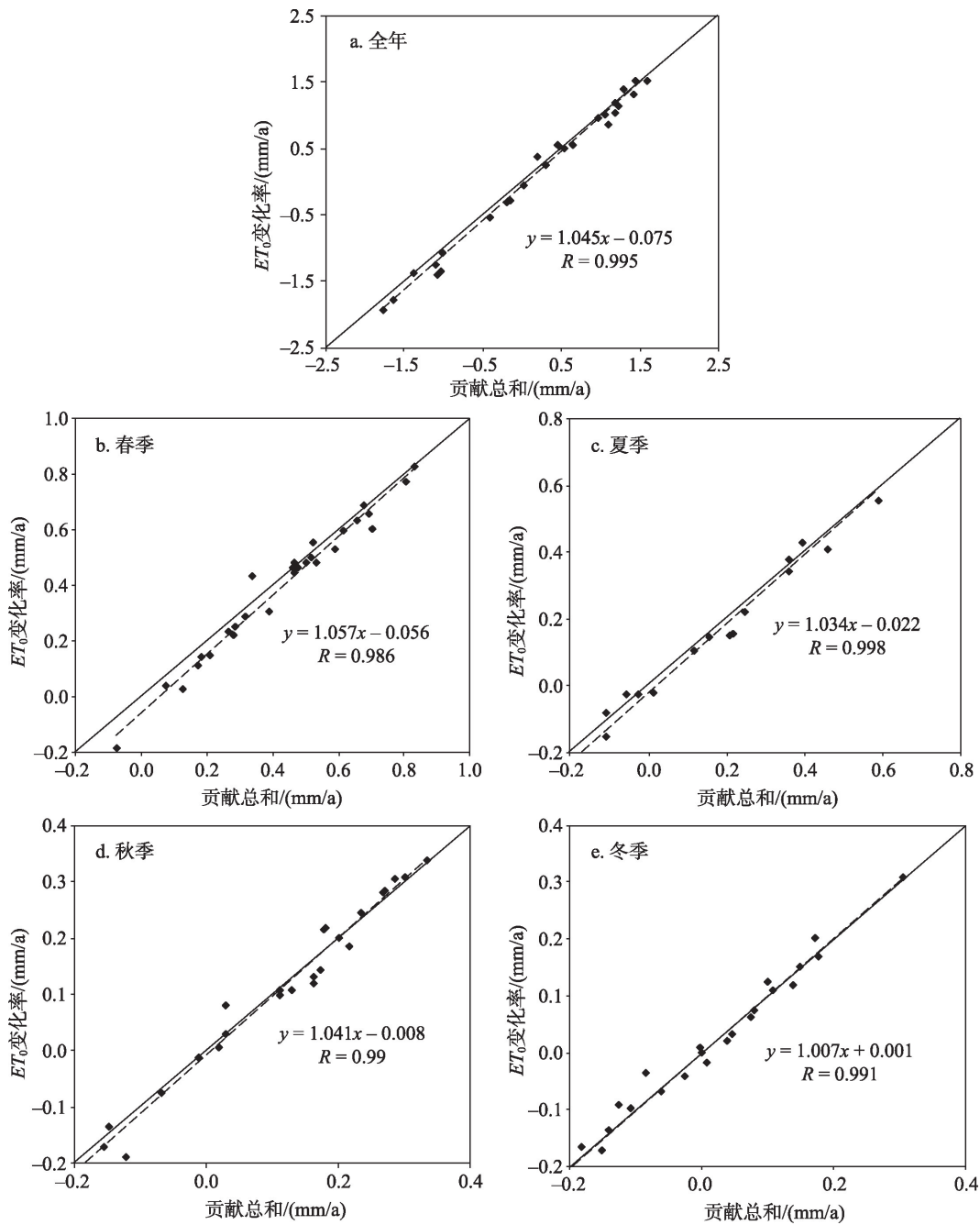


图5 1960—2016年渭河流域各站点潜在蒸散量变化率与各气象因子贡献和的拟合

Figure 5 Fitting calculated potential evapotranspiration and total contribution of meteorological factors at each meteorological station in the Weihe River Basin, 1960-2016

为0.995、0.986、0.998、0.99、0.991,均通过了0.001水平的显著性检验,这说明采用式(11)定量评估渭河流域各气象因子的变化对潜在蒸散量变化的贡献是可行的。

进一步地,表4列出了各气象因子的变化对潜在蒸散量变化趋势的贡献。可以看出,对年潜在蒸

散量的变化贡献最大的气象因子是平均气温,之后为风速、相对湿度,贡献最小的是太阳辐射;季尺度上,各气象因子对潜在蒸散量变化趋势的贡献顺序依次分别为:春季平均气温>相对湿度>风速>太阳辐射,夏季太阳辐射>平均气温>风速>相对湿度,秋季平均气温>风速>相对湿度>太阳辐射,冬季平均

表4 1960—2016年渭河流域气象因子的变化对全年和四季潜在蒸散量变化趋势的贡献

Table 4 Contribution of the changes of meteorological factors to changes of annual and seasonal potential evapotranspiration in the Weihe River Basin, 1960-2016

时间尺度	太阳辐射的贡献/(mm/a)	风速的贡献/(mm/a)	相对湿度的贡献/(mm/a)	平均气温的贡献/(mm/a)	贡献总和/(mm/a)	潜在蒸散量变化/(mm/a)
全年	-0.193	-0.564	0.25	0.784	0.277	0.239
春季	0.118	-0.185	0.231	0.311	0.476	0.459**
夏季	-0.266	-0.156	-0.016	0.177	-0.261	-0.284
秋季	-0.03	-0.092	0.05	0.157	0.085	0.081
冬季	-0.016	-0.131	-0.014	0.139	-0.022	-0.022

气温>风速>太阳辐射>相对湿度。

年尺度上,由于平均气温的升高速率最快($P<0.01$),潜在蒸散量对平均气温的敏感性也很高,使得平均气温成为过去57年来引起(正效应)潜在蒸散量增加的第一主导因子;虽然潜在蒸散量对风速的敏感性不高,但相较于太阳辐射和相对湿度,风速自身下降的速率很快($P<0.01$),使得它成为引起(负效应)潜在蒸散量增加的第二主导因子;虽然潜在蒸散量对相对湿度的敏感性最高(负敏感),但相对湿度自身的下降率很小且无显著趋势,因此相对湿度对潜在蒸散量变化的贡献(正效应)仅排到第三;尽管潜在蒸散量对太阳辐射的变化高度敏感,但太阳辐射的下降幅度较小且无显著趋势,故其对潜在蒸散量变化的实际贡献(负效应)最小。综上,在渭河流域,太阳辐射和风速的下降对年潜在蒸散量变化趋势的负效应已经被气温的上升和相对湿度的减小所带来的正效应所抵消,最终使得年潜在蒸散量呈现出微弱增加的趋势。

季尺度上,春秋季潜在蒸散量变化的归因与年尺度相似;夏季太阳辐射下降幅度较大,潜在蒸散量对它的敏感性也最高,使得太阳辐射对潜在蒸散量的贡献(负效应)最大,加上相对湿度在夏季上升,从而升温对潜在蒸散量的正效应被太阳辐射、风速的降低以及相对湿度的增加所带来的负效应所全部抵消,使夏季潜在蒸散量呈下降趋势;冬季潜在蒸散量变化的归因和夏季相似。

上述讨论都基于一个前提假设,即各气象因子间相互独立,实际上气象因子之间的相互作用非常复杂,这在某种程度上可能会混淆它们对潜在蒸散量变化的独立贡献。为了更深层地分析潜在蒸散量的影响原因,本文计算出各气象因子间的相关系

数(表5)。可以看出,相对湿度与太阳辐射和平均气温的相关性都较强且都是负相关,这是因为:大气水汽对太阳辐射有较强吸收和削弱作用^[45],所以相对湿度越大,太阳辐射越低;气温越高,饱和水汽压越高,相对湿度亦越低。因此,太阳辐射对潜在蒸散量的影响有一部分源于相对湿度的影响,相对湿度对潜在蒸散量的影响有一部分源于平均气温的影响,这可以解释太阳辐射仅在春季显著上升($P<0.05$)和潜在蒸散量仅在春季显著增加($P<0.01$)的原因:春季气温显著上升($P<0.01$),进一步引起相对湿度显著降低($P<0.01$),从而太阳辐射显著增加,这3个驱动因子对潜在蒸散量的贡献(正效应)已远大于风速下降的影响。此外,风速与太阳辐射和平均气温也有一定相关性(与太阳辐射正相关,与气温负相关),这可能是因为:气温升高使经向温度梯度下降,从而使气压梯度下降,风速下降^[44];而风速下降不利于气溶胶的扩散,从而使太阳辐射减弱。因此,太阳辐射对潜在蒸散量的影响有一部分源于风速的影响,风速对潜在蒸散量的影响有一部分源于平均气温的影响。从而,在气温升高、风速下降和太阳辐射减弱的综合影响下,潜在蒸散量在夏季和冬季呈现出减小的趋势。太阳辐射和平均气温的相关性弱,这是因为气温主要受净长波辐射的控制,而太阳辐射主要决定了净短波辐射大小,与气

表5 1960—2016年渭河流域各气象因子之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between meteorological factors in the Weihe River Basin, 1960-2016

相关系数	太阳辐射	风速	相对湿度
风速	0.381**	—	—
相对湿度	-0.720**	-0.106	—
平均气温	0.282**	-0.372*	-0.535**

温的关联度不高。

5 结论

本文基于渭河流域 28 个国家基本气象站 1960—2016 年的逐日气象观测数据,利用 FAO Penman-Monteith 公式估算潜在蒸散量,在年和季节时间尺度上分析潜在蒸散量的时空变化特点及气象因子的变化趋势,并通过敏感性分析和基于全微分法的贡献评估对潜在蒸散量的变化进行气候归因。主要结论如下:

(1) 渭河流域年潜在蒸散量在 1960—2016 年整体上呈现轻微增加趋势,年变化率为 0.239 mm/a;就各季来看,潜在蒸散量在春秋两季增加,在夏冬季减少,其中,春季潜在蒸散量的显著增加趋势对年潜在蒸散量的上升作出主要贡献。

(2) 渭河流域多年平均潜在蒸散量的空间分布特点为:东高西低,北高南低,自东北向西南递减,且东西向的差异更大。

(3) 在年尺度上,渭河流域的平均气温在过去 57 年里以每 10 年 0.297℃ 的变化率显著上升,风速则以每 10 年 0.062 m/s 的变化率显著下降,太阳辐射和相对湿度均呈微弱下降趋势;在季尺度上,除了太阳辐射在春季下降,相对湿度在夏、冬季增加以外,其余变量的变化方向都与全年一致,其中春季太阳辐射的下降与相对湿度的增加关系密切。

(4) 渭河流域潜在蒸散量对各气象因子的敏感性在各时间尺度上大多属于高度敏感,其中,年潜在蒸散量对气象因子的敏感性高低顺序为相对湿度>太阳辐射>平均气温>风速。潜在蒸散量对风速和平均气温变化的敏感性会随着海拔的增加而降低。

(5) 渭河流域各气象因子在 1960—2016 年的变化对年潜在蒸散量变化的贡献顺序为平均气温>风速>相对湿度>太阳辐射,太阳辐射和风速的下降对年潜在蒸散量变化的负效应已经被温度的升高和相对湿度的减小所带来的正效应所抵消,最终使得渭河流域的年潜在蒸散量近 57 年来呈增加趋势。

气候变化对潜在蒸散量的影响研究中,气象因子的敏感性系数只能反映出潜在蒸散量对它们变化的响应方向和水平,要刻画气象因子变化对潜在蒸散量变化的实际贡献,还需采用基于全微分的贡

献评估方法对潜在蒸散量的变化进行定量归因。比如,在本文的年尺度上,尽管潜在蒸散量对气温和风速的敏感性相较于相对湿度和太阳辐射并不高,但气温和风速自身的变化幅度很大,故基于较小的敏感性系数也能作出较大的贡献,从而使得它们成为影响渭河流域年潜在蒸散量变化的主导因子。

参考文献(References):

- [1] 苏布达,周建,王艳君,等. 全球升温 1.5℃ 和 2.0℃ 情景下中国实际蒸散发时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2018, 39(5): 293–303. [Su B D, Zhou J, Wang Y J, et al. Spatial and temporal variation of actual evapotranspiration in China under the 1.5℃ and 2.0℃ global warming scenarios[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(5): 293–303.]
- [2] 郭小娇,龚晓萍,石建省,等. 典型岩溶区潜在蒸散发变化及其影响因素[J]. 地质学报, 2019, 93(12): 3269–3281. [Guo X J, Gong X P, Shi J S, et al. The temporal variations of potential evapotranspiration and influence factors for a typical karst area[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(12): 3269–3281.]
- [3] 阮宏威,于静洁. 1992–2015 年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1292–1304. [Ruan H W, Yu J J. Changes in land cover and evapotranspiration in the five Central Asian countries from 1992 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1292–1304.]
- [4] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [5] 曹永强,刘明阳,李元菲,等. 不同潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性分析[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1780–1790. [Cao Y Q, Liu M Y, Li Y F, et al. Applicability of six potential evapotranspiration estimation methods in Liaoning Province[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1780–1790.]
- [6] 王亚俊,李俊,林忠辉,等. 气候变化对黄河中上游地区潜在蒸散发影响的估算[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 48–56. [Wang Y J, Li J, Lin Z H, et al. Assessing the impacts of climate change on the potential evapotranspiration in the upper–middle reach of the Yellow River[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(5): 48–56.]
- [7] 李元寿,贾晓红,齐艳军,等. 多年冻土区土壤蒸散发对气候变化的敏感性分析[J]. 高原气象, 2019, 38(6): 1293–1299. [Li Y S, Jia X H, Qi Y J, et al. Sensitivity of soil evapotranspiration to climate change in the permafrost area[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(6): 1293–1299.]
- [8] Martin P, Rosenberg N J, Mckenney M S. Sensitivity of evapotrans-

2020年5月

- piration in a wheat field, a forest, and a grassland to changes in climate and direct effects of carbon dioxide[J]. *Climatic Change*, 1989, 14(2): 117-151.
- [9] Goyal R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India)[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(1): 1-11.
- [10] McCuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1974, 10(3): 486-497.
- [11] Hupet F, Vanclooster M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 243(3-4): 192-204.
- [12] Gong L B, Xu C Y, Chen D L. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3): 620-629.
- [13] 梁丽乔, 李丽娟, 张丽, 等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 1-5. [Liang L Q, Li L J, Zhang L, et al. Sensitivity of the reference crop evapotranspiration in growing season in the West Songnen Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(5): 1-5.]
- [14] 刘玉汐, 任景全, 王冬妮, 等. 吉林省参考作物蒸散量时空分布及成因分析[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(11): 2208-2215. [Liu Y X, Ren J Q, Wang D N, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in Jilin Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(11): 2208-2215.]
- [15] Yin Y H, Wu S H, Chen G, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(1-2): 19-28.
- [16] Roderick M L, Rotstajn L D, Farquhar G D, et al. On the attribution of changing pan evaporation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, DOI: 10.1029/2007GL031166.
- [17] Zheng H X, Liu X M, Liu C M, et al. Assessing contributions to pan evaporation trends in Haihe River Basin, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, DOI:10.1029/2009JD012203.
- [18] 王婷婷, 孙福宝, 章杰, 等. 基于析因数数值实验方法的蒸发皿蒸发归因研究[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2064-2074. [Wang T T, Sun F B, Zhang J, et al. A new method to attribute changes of pan evaporation: The experimental detrending approach[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2064-2074.]
- [19] Duethmann D, Blöschl G. Why has catchment evaporation increased in the past 40 years? A data-based study in Austria[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2018, DOI: 10.5194/hess-2018-129.
- [20] 吴文玉, 孔芹芹, 王晓东, 等. 安徽省近 40 年参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1160-1166. [Wu W Y, Kong Q Q, Wang X D, et al. Sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration in Anhui Province in the recent 40 years[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7): 1160-1166.]
- [21] 郭金路, 谷健, 扬筑筑. 辽西地区潜在蒸散发敏感性分析及变化成因研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(1): 121-128. [Guo J L, Gu J, Yang Z Z. Sensitivity and attribution of potential evapotranspiration in Western Liaoning[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(1): 121-128.]
- [22] 黄维东, 牛最荣, 李计生, 等. 渭河源区典型小流域水沙演变规律分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 884-891. [Huang W D, Niu Z R, Li J S, et al. Water and sediment evolution in a small watershed: The headwaters of the Weihe River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 884-891.]
- [23] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 455-461. [Zuo D P, Xu Z X, Li J Y, et al. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in the Weihe River Basin under future climate change[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 455-461.]
- [24] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 近 52 年渭河流域气候变化及极端干湿事件演变特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(4): 32-36. [Jiang C, Wang F, Mu X M, et al. Temporal and spatial characteristics of climate change and extreme dry and wet events in Wei River Basin in last 52 years[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(4): 32-36.]
- [25] 雷江群, 刘登峰, 黄强. 渭河流域气候变化及干湿状况时空分布分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 175-181. [Lei J Q, Liu D F, Huang Q. Climate change and spatio-temporal distribution of dry-wet status in Wei River Basin[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(3): 175-181.]
- [26] 左德鹏, 徐宗学, 程磊, 等. 渭河流域潜在蒸散量时空变化及其突变特征[J]. *资源科学*, 2011, 33(5): 975-982. [Zuo D P, Xu Z X, Cheng L, et al. Spatial-temporal variations and mutations of potential evapotranspiration in the Weihe River Basin[J]. *Resources Science*, 2011, 33(5): 975-982.]
- [27] 黎云云, 畅建霞, 王义民, 等. 渭河流域径流对土地利用变化的时空响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 232-238. [Li Y Y, Chang J X, Wang Y M, et al. Spatiotemporal responses of runoff to land use change in Wei River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(15): 232-238.]
- [28] 任立良, 沈鸿仁, 袁飞, 等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. *水科学进展*, 2016, 27(4): 492-500. [Ren L L, Shen H R, Yuan F, et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe Catchment in a changing environment[J]. *Advances in Wa-*

- ter Science, 2016, 27(4): 492–500.]
- [29] 谢贤群, 王菱. 中国北方近 50 年潜在蒸发的变化[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 683–691. [Xie X Q, Wang L. Changes of potential evaporation in northern China over the past 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 683–691.]
- [30] 张翀, 李晶, 任志远. 西北地区 1962 年至 2000 年降水量变化的时空特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2298–2304. [Zhang C, Li J, Ren Z Y. Spatial and temporal characteristics of precipitation changes from 1962 to 2000 in Northwestern China[J]. Resources Science, 2010, 32(12): 2298–2304.]
- [31] 邰淑彩, 孙韞玉, 何娟娟. 应用数理统计[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005. [Tai S C, Sun Y Y, He J J. Applied Mathematical Statistics[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005.]
- [32] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9–10): 645–654.
- [33] 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. [Zhang S H, Liu S X, Mo X G, et al. Assessing the impact of climate change on reference evapotranspiration in Aksu River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(11): 1363–1370.]
- [34] 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. [Ma X N, Zhang M J, Wang S J, et al. Evaporation paradox in the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 645–656.]
- [35] Zuo D P, Xu Z X, Yang H, 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(8): 1149–1160.
- [36] Gao G, Chen D L, Xu C Y, et al. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960–2002[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, DOI: 10.1029/2006JD008010.
- [37] Huang S Z, Chang J X, Huang Q, et al. Spatio-temporal changes in potential evaporation based on entropy across the Wei River Basin[J]. Water Resources Management, 2014, 28(13): 4599–4613.
- [38] Wild M. Global dimming and brightening: A review[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, DOI: 10.1029/2008JD011470.
- [39] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(4): 255–278.
- [40] 蒋冲, 王飞, 张仁慧, 等. 渭河流域近 52 年日照时数和风速时空变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(5): 228–234. [Jiang C, Wang F, Zhang R H, et al. Variation characteristics of sunshine duration and wind speed in the last 52 years in Wei River Basin [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(5): 228–234.]
- [41] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 退耕还林(草)背景下渭河流域植被覆盖时空变化分析[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(4): 470–474. [Jiang C, Wang F, Mu X M, et al. Analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in Wei River Basin under background of converting farmland into forest or grassland[J]. Research of Agricultural Modernization, 2012, 33(4): 470–474.]
- [42] 冯星, 郭建青, 孙东永, 等. 近 55a 渭河流域气候变化[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 718–725. [Feng X, Guo J Q, Sun D Y, et al. Climate change characteristics in Weihe River Basin from 1960 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 718–725.]
- [43] 李烁阳. 渭河流域水文气象要素演变特征及径流演变归因分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019. [Li S Y. Study on the Evolution Characteristics Hydro-Meteorological Factors and Attribution Analysis of Runoff Change in Weihe River Basin[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.]
- [44] Sun S L, Chen H S, Wang G J, et al. Shift in potential evapotranspiration and its implications for dryness/wetness over Southwest China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(16): 9342–9355.
- [45] 申彦波, 赵东, 祝昌汉, 等. 近 50 年来鄂尔多斯地面太阳辐射的变化及与相关气象要素的联系[J]. 高原气象, 2009, 28(4): 786–794. [Shen Y B, Zhao D, Zhu C H, et al. Variational characteristics of surface solar radiation and associated meteorological elements over Ordos Plateau in recent 50 years[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(4): 786–794.]

Climate explanation of the potential evapotranspiration changes in Weihe River Basin

GUO Mengyao¹, SHE Dunxian^{1,2}, ZHANG Liping^{1,2,3}, TANG Rouxin¹, ZHAO Pengyan¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan 430072, China;

3. Huanggang Normal University, Huanggang 438000, China)

Abstract: Analyzing the changes in potential evapotranspiration (ET_0) and the attribution is an important way to understand hydrologic process and its response to climate change. In this study, after applying the FAO Penman-Monteith equation to estimate the ET_0 in the Weihe River Basin for the period of 1960-2016, the differential method was employed to quantify the contribution of the four meteorological factors, i.e. solar radiation (R_s), wind speed (u_2), relative humidity (RH), and average temperature (T), to the ET_0 changes. The main results are shown below. During the 57 years, annual ET_0 showed a slightly increasing trend of 0.239 mm/a, and multi-year average annual ET_0 increased from the west to the east and from the south to the north of the basin spatially. We found that annual ET_0 was most sensitive to RH , followed by R_s and T , and least sensitive to u_2 . Moreover, the sensitivity coefficients of T and u_2 decreased with increasing elevation. From the perspective of contribution, the changes in T contributed most to the changes of annual ET_0 , followed by u_2 and RH , and the changes in R_s showed the smallest contribution to annual ET_0 changes. Generally speaking, the negative effects caused by the decrease in R_s and u_2 to annual ET_0 changes were offset by the positive effects caused by the increase in T and decrease in RH , which finally resulted in the increasing trend in annual ET_0 during 1960-2016 in the whole basin. Since the correlation among the meteorological factors may influence their individual contribution to ET_0 changes, we can fully discuss the attribution of ET_0 changes by considering the interactions between these factors in practice. This study is significant for understanding the influence mechanism of climate change to hydrologic cycle as well as improving our capacity to cope with climate change regionally.

Key words: potential evapotranspiration; climate change; meteorological factor; sensitivity coefficient; total differential method; attribution analysis; Weihe River Basin