

文章编号:1004-3918(2020)04-0638-07

伏牛山地区潜在蒸散发变化特征及成因分析

张静静, 梁 丹

(郑州师范学院 地理与旅游学院, 郑州 450044)

摘 要: 基于河南省西部22个县市的22个气象站点及相邻的陕西省丹凤县和商南县的2个气象站点2016—2017年的逐日气象数据,运用Penman-Monteith模型,估算伏牛山地区潜在蒸散发量,分析其时空分布特征,并运用相关分析和地理探测器方法探讨其空间差异的主要驱动因素。结果表明:①伏牛山地区年潜在蒸散发量平均值为792.89 mm,空间上呈自南向北递增;春夏两季潜在蒸散发量对全年潜在蒸散发量贡献最大,占全年的71.53%。②该地区潜在蒸散发量具有明显的年内分配特征,整体表现为先增大后减小,最高值出现在7月,最低值出现在1月。③该地区潜在蒸散发量与降水量相关性最大,呈显著的负相关关系;地理探测器结果发现,降水量对潜在蒸散发量空间差异的贡献率最大,且降水量与其他因素的交互作用贡献率显著增大,表明潜在蒸散发量的空间差异是由降水量与其他因素相互作用、共同影响产生的。

关键词: 潜在蒸散发; Penman-Monteith模型; 空间差异; 地理探测器; 伏牛山地区

中图分类号: P 426.2 **文献标识码:** A

Characteristics of Potential Evapotranspiration and Its Influence Factors in Funiu Mountain Region

ZHANG Jingjing, LIANG Dan

(College of Geography and Tourism, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data from 2016–2017 of 24 meteorological stations including 22 meteorological stations in 22 counties and cities in the west of Henan Province and two meteorological stations in Danfeng County and Shangnan County in Shaanxi Province, the potential evapotranspiration in Funiu Mountain Region was estimated using Penman-Monteith model. And the spatial-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration were analyzed. Correlation analysis and geographical detector method were then used to explore the main driving factors of the spatial differences in potential evapotranspiration. The main results are as follows: ① The average annual potential evapotranspiration in the Funiu Mountain Region is 792.89 mm, which increases spatially from south to north. The potential evapotranspiration in spring and summer contributes the largest annual evapotranspiration, reaching 71.53% of the year. ② The potential evapotranspiration has obvious annual distribution characteristics, and as a whole, the value of potential evapotranspiration increases first and then decreases. While the highest value appears in July and the lowest value appears in January. ③ The correlation coefficient between potential evapotranspiration and precipitation reached the maximum, showing a significant negative correlation. The contribution rate of the variation is the largest, and the contribution rate of the interaction between precipitation and other factors increases significantly, indicating that the spatial variation of the potential evapotranspiration is caused by the interaction and common influence of precipitation and other factors.

Key words: potential evapotranspiration; Penman-Monteith model; spatial difference; geographical detector; Funiu Mountain Region

收稿日期: 2020-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671090)

作者简介: 张静静(1991-),女,讲师,博士,主要研究方向为土地利用变化与生态系统服务

据统计,全球陆地表面65%的降水量会以蒸散发的形式返回到大气中^[1],因此水的蒸散发被认为是陆地表面水循环过程中最重要的环节^[2]. 近年来,关于陆地表面水的蒸散发量的研究已成为地理学、水文学等相关学科研究的热点之一^[3–4]. 准确计算和分析蒸散发量的变化特征和驱动机制不仅有助于应对全球气候变化与环境问题,而且对水资源的合理配置、陆地生态系统的管理,以及农业旱情的监测等具有重要的指导意义^[5–6].

潜在蒸散发量是指在一定的气象条件下,且有充足水分供应的情况下,某一固定下垫面可以达到的最大蒸散发量. 潜在蒸散发量是实际蒸散发量的理论上限,也是计算实际蒸散发量的基础,因此准确估算潜在蒸散发量是计算实际蒸散发量的关键^[7]. 目前常见的潜在蒸散发量的估算方法大致可以分为5种,即温度法、辐射法、综合法、水量平衡法和质量传导法^[8],每种计算方法都有其优缺点和不同的适用条件. 许多研究表明,以能量平衡与水汽扩散理论为基础的Penman–Monteith公式,能够反映蒸散发必须具备的气象条件,包括气温、风速、相对湿度、太阳辐射等,且适用于不同气候区潜在蒸散发量的计算,是学术界认可度最高的一种计算方法^[9–10]. 该方法是联合国粮食及农业组织(FAO)计算潜在蒸散发量的首选公式,被认定为计算潜在蒸散发量的标准方法,且还在不断地进行修正和推广使用^[11]. 该方法充分考虑了植被的生理特性与大气的物理特性,理论依据充分,计算精度高. 使用该方法估算潜在蒸散发量,可以更清楚地认识其变化过程及其影响机制. 本研究基于河南省西部22个县市的22个气象站点及相邻的陕西省丹凤县和商南县的2个气象站点的逐日气象数据,运用Penman–Monteith模型估算该地区的潜在蒸散发量,从年、四季和月3个时间尺度分析该地区潜在蒸散发量的时空分布特征,并运用相关分析和地理探测器方法探讨潜在蒸散发量空间差异的主要驱动因素,以期对该地区水资源的合理配置以及陆地生态系统的管理提供帮助.

1 数据与方法

1.1 研究区概况

伏牛山处于河南省西部,是秦岭山系在河南境内的一条重要余脉,呈西北—东南走向,西至河南省与陕西省交界,东至河南省南阳的方城北部,北与熊耳山、外方山相接,南至南阳盆地. 研究区包括卢氏、栾川、嵩县、鲁山、内乡、西峡、镇平和南召8个县域单元(为了对气象数据插值时提高精度而选择陕西省丹凤县和商南县气象站点的数据,但其不包括在研究区内),面积约2万km². 其中,卢氏、栾川、嵩县和鲁山位于伏牛山北坡,内乡、西峡、镇平和南召位于伏牛山南坡(图1). 该地区地势自西向东逐渐降低,海拔高度50~2200 m,地貌类型复杂,高差起伏较大,气候类型属于南暖温带与北亚热带过渡带气候以及中国湿润区与半湿润区过渡带气候^[12–13].

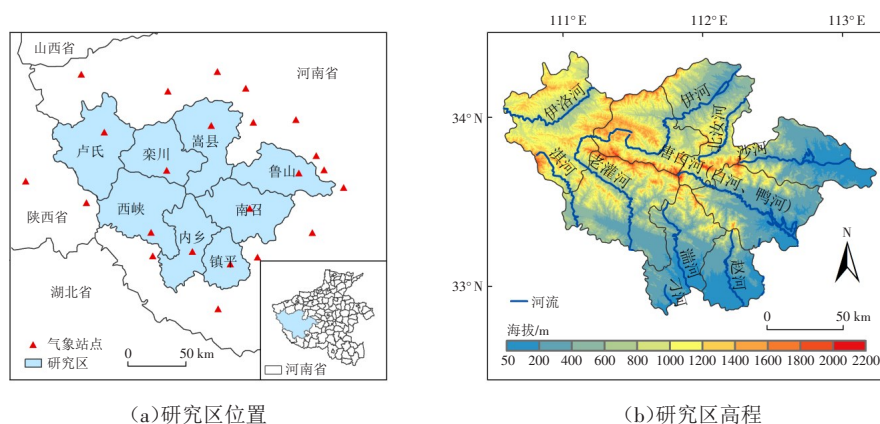


图1 研究区位置及高程示意图

Fig.1 Location and elevation map of the study area

1.2 数据来源

本研究气象数据来自研究区及其周边24个气象站点(图1)的逐日观测数据. 其中22个气象站点(灵宝、洛南、宜阳、洛宁、卢氏、伊川、汝州、栾川、汝阳、西峡、嵩县、内乡、鲁山、镇平、南召、南阳、方城、宝丰、叶

县、淅川、邓州和平顶山)位于河南省境内,两个气象站点(丹凤和商南)位于陕西省境内.研究使用的气象数据均为2016—2017年两年的平均值.气象资料来源于河南省气象局(<http://ha.cma.gov.cn/>)和国家气象局气象科学数据中心(<http://cdc.nmic.cn/home.do>),具体包括2016—2017年逐日平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、降水量、风速、日照时数和平均本站气压.由于研究区内没有太阳辐射观测点,因此所用太阳辐射数据由日照时数计算获得^[11].

1.3 研究方法

1.3.1 潜在蒸散发量估算方法 基于逐日平均气温、最高和最低气温、平均相对湿度、降水量、风速、日照时数以及平均本站气压资料,根据联合国粮农组织(FAO)提出的修正Penman-Monteith公式(日尺度)^[11]计算研究区潜在蒸散发量,运用ANUSPLIN气象专用插值软件进行空间插值处理^[14],生成潜在蒸散发量的空间分布图,计算公式为:

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

式中: ET_0 为潜在蒸散发量, mm; Δ 为饱和水汽压—温度曲线斜率, $\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$; R_n 为冠层表面净辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; T 为日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; γ 为温度计常数, $\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$; u_2 为2 m高处的风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; e_s 为饱和水汽压, kPa ; e_a 为实际水汽压, kPa . 以上各项参数可由气象要素计算得到,具体计算方法参见文献[11].

式中各项计算公式如下:

$$1) R_n = R_{ns} - R_{nl}.$$

其中: R_{ns} 为短波净辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_{nl} 为长波净辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

$$2) R_{ns} = 0.77 \times \left(0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) R_a.$$

其中: n 为每天日照时数, h; N 为最大天文日照时数, h; R_a 为碧空太阳总辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

$$3) R_a = 37.59 d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s).$$

其中: d_r 为日地相对距离; ω_s 为日落时角度, rad; φ 为纬度, rad; δ 为太阳磁偏角, rad.

$$4) R_{nl} = 4.903 \times 10^{-9} \times \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left(\frac{(T_{\max} + 273.15)^4 + (T_{\min} + 273.15)^4}{2} \right).$$

其中: $T_{\max}$ 为日最高气温, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\min}$ 为日最低气温, $^{\circ}\text{C}$.

1.3.2 成因分析方法 借助地理探测器方法探讨潜在蒸散发量空间差异特征的成因.地理探测器是探测某事物的空间分异特征以及揭示其背后驱动机制的统计学方法^[15].该方法的核心是基于一种假设,即若某自变量对因变量存在重要影响,那么该自变量和因变量应该具有相似的空间分布特征.借助这一假设,本文利用地理探测器探测潜在蒸散发量空间差异与各驱动因素之间的关系.

地理探测器包括4种子探测器,即因子、生态、交互和风险探测器,各探测器的度量方法和主要目标存在着较大差异^[16].本研究借助因子探测器和交互探测器,分析各驱动因素对潜在蒸散发量空间差异的影响程度,以及驱动因素两两之间对潜在蒸散发量空间差异的交互作用.

2 结果与分析

2.1 潜在蒸散发量空间分布特征

基于Penman-Monteith模型估算研究区潜在蒸散发量,得到年潜在蒸散发量为740.57~870.07 mm,平均792.89 mm.由图2可以看出,研究区年潜在蒸散发量呈自南向北递增的趋势.伏牛山北坡潜在蒸散发量明

显高于南坡,说明北坡气候状况相对南坡较为干旱. 高值区集中分布在研究区最北端,即伏牛山北坡的山麓地带,年潜在蒸散发量均在 820 mm 以上,这些地区降水量较少,气候比较干旱;低值区集中分布在研究区的西南端,即研究区南坡的山麓地带,年潜在蒸散发量为 740~760 mm,这些地区河流湖泊密布,降水量丰富,潜在蒸散发量小,气候比较湿润.

根据研究区实地的气候特征,将 3、4、5 月划为春季,6、7、8 月划为夏季,9、10、11 月划为秋季,12、1、2 月划为冬季. 图 3 为研究区四季潜在蒸散发量的空间分布. 由图 3 可以看出,研究区四季潜在蒸散发量的空间分布存在明显差异:由图 3(a)可以看出,研究区春季潜在蒸散发量空间

格局与年潜在蒸散发量较为相似,南坡山麓地带潜在蒸散发量最低,北坡山麓地带潜在蒸散发量最高;由图 3(b)可以看出,夏季潜在蒸散发量高值区分布较为广泛,普遍分布在研究区的中低山地区,这是由于夏季中低山地区气温较高,降水量丰富,有利于地表面蒸发,所以潜在蒸散发量较大,且夏季潜在蒸散发量低值区分布面积较小,主要分布在伏牛山高海拔地区的山脉主脊地带,这些地区气温相对较低,风速较小,不利于蒸发,因此蒸散发量最小;由图 3(c)和(d)可知,研究区秋季和冬季的潜在蒸散发量空间格局较为相似,低值区所占面积比例较大,主要分布在研究区南坡的中低山地区,高值区所占面积比例较小,主要分布在海拔较高的山脊地带. 表 1 为研究区年和四季潜在蒸散发量的统计值,从中可以看出:夏季潜在蒸散发量的平均值为 316.45 mm,占全年的 39.91%,对全年潜在蒸散发量的贡献率最大;其次为春季,平均值为 250.72 mm,占全年的 31.62%;秋季和冬季平均值分别为 134.06 mm 和 91.66 mm,对全年潜在蒸散发量的贡献率最小,分别为 16.91% 和 11.56%. 由此看出,春夏两季潜在蒸散发量对全年潜在蒸散发量的贡献率最大,占全年的 71.53%.

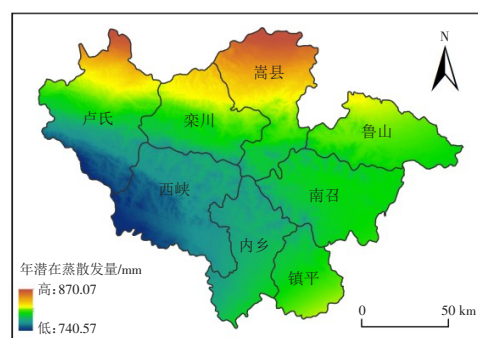


图 2 研究区年潜在蒸散发量分布图

Fig.2 Spatial distribution of annual potential evapotranspiration of the the study area

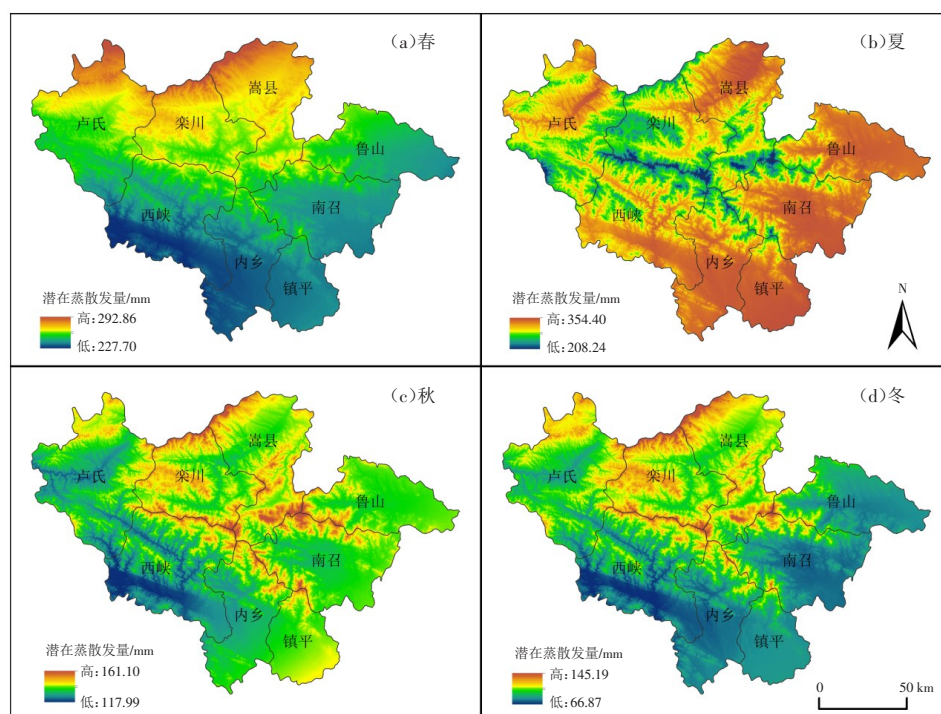


图 3 研究区四季潜在蒸散发量的空间分布

Fig.3 Spatial distributions of seasonal potential evapotranspiration in the study area

表1 研究区年和四季潜在蒸散发量

Tab.1 Statistics of annual and seasonal potential evapotranspiration in the study area

潜在蒸散发量	春	夏	秋	冬	年
平均值/mm	250.72	316.45	134.06	91.66	792.89
最大值/mm	292.86	354.40	161.10	145.19	870.07
最小值/mm	227.70	208.24	117.99	66.87	740.57
贡献率/%	31.62	39.91	16.91	11.56	100.00

注：表中“年潜在蒸散发量”的“最大值”和“最小值”是基于年潜在蒸散发量栅格数据统计的最大值和最小值。

2.2 潜在蒸散发量年内变化特征

研究区潜在蒸散发量具有明显的年内分配特征(图4)，整体表现为先增大后减小，最高值出现在7月，最低值出现在1月。较低值集中分布在10、11、12、1、2月，这个时期气温较低，太阳辐射量较小，植被处于非生长季，不利于地表水的蒸发和蒸腾，因此潜在蒸散发量较低。从3月开始，潜在蒸散发量迅速增加，在7月达到最大。高值区集中分布在5—8月，这个时期气温逐渐回升，降水量和太阳辐射量逐渐增大，水热条件和光照条件十分充足，有利于地面水蒸发，且植被处于生长茂盛期，蒸腾和蒸发旺盛，因此潜在蒸散发量较大。

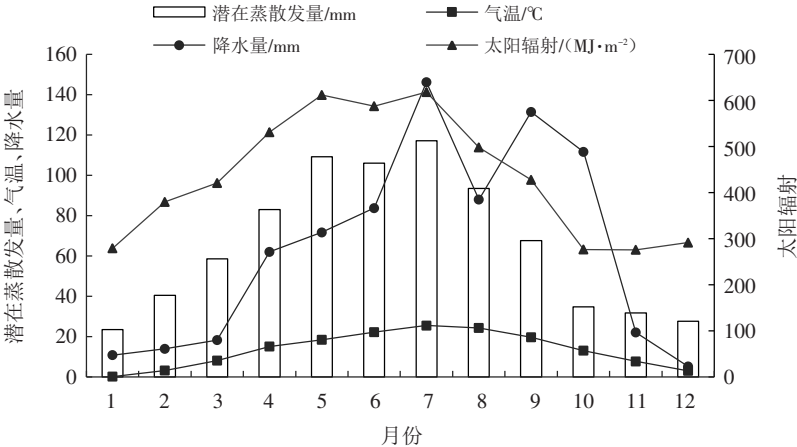


图4 研究区潜在蒸散发量、气温、降水量及太阳辐射月变化

Fig.4 Monthly variation of potential evapotranspiration, temperature, precipitation, and solar radiation in the study area

2.3 潜在蒸散发空间差异成因分析

基于气象站点数据，对研究区潜在蒸散发量分别与气温、降水量和太阳辐射进行相关性分析。图5显示潜在蒸散发量与降水量呈负相关，相关性达到最大(-0.40, $P<0.05$)，表明降水量大的区域气候较湿润，潜在蒸散发量较小，降水量越小的区域则潜在蒸散发量越大。其次，潜在蒸散发量与太阳辐射的相关系数为0.29，太阳辐射可以为蒸散发过程提供能量，太阳辐射量越大，潜在蒸散发量越大。潜在蒸散发量与气温的相关性最小，为0.27，气温的升高可为水汽输送提供动力，气温越高潜在蒸散发量越大。

基于气象站点数据，运用ANUSPLIN软件进行插

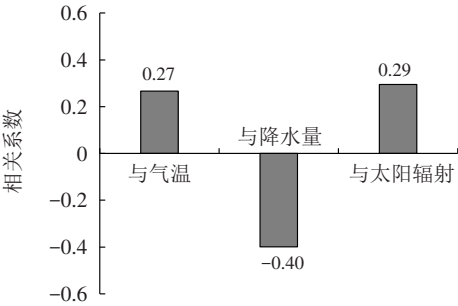


图5 潜在蒸散发量与各气象要素的相关系数对比

Fig.5 Correlation coefficient between potential evapotranspiration and meteorological elements

值处理,生成年均气温、降水量和太阳辐射空间数据. 借助 ArcGIS10.2 软件在研究区边界图上创建随机采样点(1000个),并运用多值提取至点(Extract Multi Values to Points)工具,对潜在蒸散发量、气温、降水量与太阳辐射量空间数据按自然间断法重分类后的图层进行采样,生成Excel 属性表. 借助地理探测器模型,将潜在蒸散发量作为 Y 变量,将气温、降水量与太阳辐射量作为 X 变量,得到各驱动因素对潜在蒸散发量的贡献率(表2). 就因子探测结果来看,降水量对潜在蒸散发量的贡献率最大,为0.54($P<0.01$),太阳辐射和气温的贡献率都比较小,分别为0.05和0.04. 由此来看,在这3个影响因素中,降水量是导致潜在蒸散发量空间差异的主导因素. 就交互探测结果来看,任意两种因素的交互作用均为非线性增强(两种因素的交互作用大于单一因素独立作用之和),即任何两种驱动因素对潜在蒸散发量的交互影响都要大于单一因素的影响. 具体体现在降水量与气温、太阳辐射对潜在蒸散发量的交互作用贡献率都比较大,分别为0.81和0.77,均通过了0.01的显著性检验,气温与太阳辐射的交互作用贡献率为0.17,表明潜在蒸散发量的空间差异是由多种因素相互作用共同影响产生的,尤其是降水量与气温的交互影响最为显著.

表2 潜在蒸散发空间差异驱动因素贡献率

Tab.2 Contribution rates of influencing factors to the spatial difference of potential evapotranspiration

指标	气温	降水量	太阳辐射	气温 $\cap$ 降水量	气温 $\cap$ 太阳辐射	降水量 $\cap$ 太阳辐射
q 值	0.04	0.54	0.05	0.81	0.17	0.77
P 值	>0.05	<0.01	>0.05	<0.01	>0.05	<0.01

3 结论与讨论

基于研究区24个气象站点的逐日气象数据,运用 Penman–Monteith 模型估算了该地区潜在蒸散发量,从年、季和月3个时间尺度分析了潜在蒸散发量的时空分布特征,并运用相关分析和地理探测器方法探讨了潜在蒸散发量空间差异特征的主要驱动因素. 得出以下结论:

- 1)研究区年潜在蒸散发量平均值792.89 mm,空间上呈自南向北递增,伏牛山北坡潜在蒸散发量明显高于南坡,说明北坡气候状况相对南坡较为干旱.
- 2)研究区四季潜在蒸散发量的空间分布存在明显差异,春季潜在蒸散发量空间格局与年潜在蒸散发量较为相似;夏季潜在蒸散发量高值区分布较为广泛;秋季与冬季的潜在蒸散发量空间格局较为相似,表现为低值区所占面积比例较大. 从各季潜在蒸散发量对全年潜在蒸散发量的贡献来看,春夏两季对全年潜在蒸散发量贡献最大,占全年的71.53%.
- 3)研究区潜在蒸散发量具有明显的年内分配特征,整体表现为先增大后减小,最高值出现在7月,最低值出现在1月.
- 4)相关性分析发现,潜在蒸散发量与降水量相关性最大,呈显著的负相关关系($-0.4, P<0.05$),与太阳辐射、气温分别呈正相关关系,且相关性稍逊一筹,分别为0.29和0.27. 地理探测器结果发现,就因子探测结果来看,降水量对潜在蒸散发量空间差异的贡献率最大,为0.54;太阳辐射和气温的贡献率都比较小. 就交互探测结果来看,任何两种驱动因素对潜在蒸散发量的交互影响都要大于单一因素的影响:降水量与气温、太阳辐射对潜在蒸散发量的交互作用贡献率都比较大,分别为0.81和0.77;气温与太阳辐射的交互作用贡献率为0.17. 表明潜在蒸散发量的空间差异是由多种因素相互作用共同影响产生的,尤其是降水量与气温的交互影响最为显著.

本研究运用 Penman–Monteith 模型估算了研究区潜在蒸散发量,运用 ANUSPLIN 气象专用插值软件对潜在蒸散发量进行了空间化处理,并借助地理探测器方法探讨了潜在蒸散发量空间差异的驱动机制,研究结果有助于水资源和陆地生态系统在特定空间位置上的优化管理. 但本研究未考虑潜在蒸散发量在时间尺度上的变化特征及其驱动因素,在全球气候变暖的大背景下^[17],区域尺度上蒸散发量的时间变化特征及其对气候因素的敏感性研究显得尤为重要^[18]. 因此,未来的研究若能注重搜集长周期的气象数据,开展时间尺度上的相关研究,将有助于应对气候变化环境下的水资源安全和粮食安全等问题.

参考文献:

- [1] DE DIOS V R, ROY J, FERRIO J P, et al. Processes driving nocturnal transpiration and implications for estimating land evapotranspiration[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 901–908.
- [2] PAN S, TIAN H, DANGAL S R S, et al. Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO₂ in the 21st century[J]. *Earth's Future*, 2015, 3(1): 15–35.
- [3] 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.
- [4] 曹永强, 肖春柳, 李元菲, 等. 河北省春季潜在蒸散量变化特征与成因[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 195–201, 209.
- [5] GAO X, PENG S, WANG W, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of reference evapotranspiration trends in Karst area: A case study in Guizhou Province, China[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2016, 128(5): 677–688.
- [6] JHAJHARIA D, KUMAR R, DABRAL P P, et al. Reference evapotranspiration under changing climate over the Thar Desert in India[J]. *Meteorological Applications*, 2015, 22(3): 425–435.
- [7] KINGSTON D G, TODD M C, TAYLOR R G, et al. Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(20): 1437–1454.
- [8] XU C Y, SINGH V P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(2): 305–319.
- [9] MCMAHON T A, FINLAYSON B L, PEEL M C. Historical development of models for estimating evaporation using standard meteorological data[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*, 2016, 3(6): 788–818.
- [10] 张颖, 郝兴明, 花顶, 等. 潜在蒸散发估算的简化方法及其应用[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1431–1439.
- [11] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper 56[R]. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 1998: 15.
- [12] 张静静, 刘亚亭, 朱连奇. 2000—2014年豫西山植被NDVI时空变化特征分析[J]. *河南科学*, 2015, 33(8): 1440–1445.
- [13] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 等. 基于栅格的豫西山区地形起伏特征及其对人口和经济的影响[J]. *地理学报*, 2018, 73(6): 1093–1106.
- [14] 张静静, 郑辉, 朱连奇, 等. 豫西山植被NDVI及其气候响应的多维变化[J]. *地理研究*, 2017, 36(4): 765–778.
- [15] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116–134.
- [16] WANG J F, ZHANG T L, FU B J. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67(8): 250–256.
- [17] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43–51.
- [18] FAN Z X, THOMAS A. Decadal changes of reference crop evapotranspiration attribution: Spatial and temporal variability over China 1960–2011[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 461–470.

(编辑 孟兰琳)