

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.039.

李帅, 宋进喜, 齐贵增. 基于 Budyko 模型的渭河流域蒸散发时空变化归因分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 304-314.

Li Shuai, Song Jinxi, Qi Guizeng. Analysis of Spatiotemporal Variation and Attribution of Evapotranspiration in Weihe River Basin Based on Budyko Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 304-314.

基于 Budyko 模型的渭河流域蒸散发时空变化归因分析

李 帅^{1,2}, 宋进喜^{1,2,3}, 齐贵增^{1,2}

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,
西安 710127; 3.西北大学 秦岭研究院, 西安 710127)

摘 要: [目的] 定量评估渭河流域蒸散发变化趋势, 分析其对环境变化的响应, 有利于该区域水资源变化的研究。[方法] 基于 Budyko 框架, 结合归一化植被指数、土地利用类型、GLEAM 蒸散发遥感数据、气象水文和社会经济等数据分析各驱动要素的趋势, 构建了时变 Budyko 参数 n 的经验模型, 采用弹性系数法定量评估各要素变化对蒸散发的影响。[结果] (1) 1990—2020 年渭河流域实际蒸散发呈现显著增长的趋势, 整体增速为 1.98 mm/a, 空间上呈东南向西北逐渐减少的趋势。(2) 渭河流域下垫面参数 n 呈现增长的趋势, 参数 n 与该地区的 NDVI、人口、耕地面积、草地和 GDP 相关性较高。在对蒸散发模拟时, 时变参数 n 模拟蒸散发的精度整体优于恒定参数 n 。(3) 渭河流域蒸散发对降水量最敏感, 对下垫面参数 n 不敏感, 下垫面参数 n 对 NDVI 最敏感。(4) 影响蒸散发变化程度大小依次为降水、下垫面参数、潜在蒸散发。[结论] 研究时段内渭河流域蒸散发呈现显著增长趋势, 气候变化对该地区蒸散发的变化起着主导作用, 但人类活动对蒸散发的影响越来越明显。

关键词: Budyko 模型; 蒸散发; 归因分析; 渭河流域

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0304-11

Analysis of Spatiotemporal Variation and Attribution of Evapotranspiration in Weihe River Basin Based on Budyko Model

Li Shuai^{1,2}, Song Jinxi^{1,2,3}, Qi Guizeng^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environment Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 3. Institute of Qinling Mountains, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to quantitatively assess the evapotranspiration trends and analyze its response to environmental changes in the Weihe River Basin, so as to be conducive to the study of water resources change in this region. [Methods] Based on the Budyko framework and combined with NDVI, land use type, GLEAM evapotranspiration remote sensing data, meteorological and hydrological data and social and economic data, the trend of each driving factor was analyzed, an empirical model of time-varying Budyko parameter n was constructed, and the elastic coefficient method was adopted to quantitatively evaluate the influence of each factor change on evapotranspiration. [Results] (1) From 1990 to 2020, the actual evtranspiration in the Weihe River Basin showed a significant growth trend, with the overall growth rate of 1.98 mm/a, and the spatial trend was gradually decreasing from southeast to northwest. (2) The hydrothermal parameter n of the underlying surface of the Weihe River Basin showed an increasing trend, and parameter n had a high correlation with the NDVI, population, cultivated land area, grassland and GDP

收稿日期: 2023-10-22

修回日期: 2023-12-08

资助项目: 国家自然科学基金专项项目“黄河流域土壤-植被-水文相互作用与水土过程”(42041004)

第一作者: 李帅(1997—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事水循环方向研究。E-mail: lishuai1339@outlook.com

通信作者: 宋进喜(1971—), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 主要从事水文学、水生态及水资源方向研究。E-mail: jinxisong@nwu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

of the region. In the simulation of evapotranspiration, the results of the empirical model with time-varying parameter n are better than those with constant parameter n . (3) Evapotranspiration in Weihe River Basin was the most sensitive to precipitation, but not to underlying surface parameter n , which was most sensitive to NDVI. (4) Precipitation contributed the most to evapotranspiration, followed by underlying surface factors, and potential evapotranspiration contributed the least. [Conclusion] Evapotranspiration in the Weihe River Basin showed a significant increase trend during the study period, and climate change played a leading role in the change of evapotranspiration in this region, but the influence of human activities on evapotranspiration became more and more obvious.

Keywords: Budyko model; evapotranspiration; attribution analysis; Weihe River Basin

蒸散发(Evapotranspiration)是指陆表或植物体内的水以水汽的方式蒸发或蒸腾进入大气的过程,是水循环中关键的一环^[1]。全球陆地多年平均降雨有六成通过蒸散发回到大气,而在干旱地区近九成降水以蒸散发的形式回归大气^[2]。此外,蒸散发还参与能量转换和物质循环。地表吸收的太阳辐射能量一半是通过蒸散发以潜热的形式消耗的,而植物光合作用过程中的碳氮循环也需要蒸腾作用^[3]。因此,了解蒸散发的变化规律对研究地球水循环、能量流动和物质循环具有重要的意义。蒸散发作为气候、水文和生态的中间纽带,研究其驱动要素以及模拟蒸散发变化过程已成为当前研究的热点之一^[4]。随着全球气候变化和城市化进程的加快,陆面环境发生了变化,其中影响陆面蒸散发变化的主要原因是区域的水热条件,如降水、径流和气温等。但随着研究的不断深入,不少学者发现下垫面状况,如植被、海拔、土壤、人口、土地类型、灌溉面积等,也是驱动陆面蒸散发变化的重要因素^[5]。在水资源充沛的地区,蒸散发变化对流域水资源变化影响不大;但是在水资源匮乏的地区,蒸散发在水资源管理中显得十分重要,蒸散发的变化甚至会直接或间接地影响当地的生态环境^[6]。

渭河流域地处黄河中游地区,是典型的半干旱半湿润区域。水是当地工农业的重要自然资源,为当地人民生活 and 经济发展提供着重要的保障^[7]。随着工农业的发展和城市化的推进,渭河流域水文生态发生了变化,径流持续减少,流域越来越干旱^[8]。因此,合理规划利用水资源,提高当地的水资源利用效率对渭河流域地区有着重要的战略意义,而这一过程离不开对该地区蒸散发变化过程和驱动机理的研究^[9]。Budyko 模型由于其原理简单和计算方便被广泛应用在蒸散发的研究当中,该理论假设区域内的蒸散发主要受水分要素和能量要素的影响,而其他要素,诸如植被覆盖等环境变化的影响统统归结于下垫面参数中^[10]。已有不少学者将下垫面参数拟合到 Budyko 水热耦合参数中探究不同流域径流变化的驱动因素,

但鲜有人将 Budyko 模型运用到流域蒸散发变化的归因中;且对于不同下垫面驱动因子间关联性的研究较少,对于全面综合地考虑气候活动和人类活动对于水热耦合因子的影响也不足。因此,构建多要素影响下的时变 Budyko 水热耦合模型,并对蒸散发变化进行定量归因十分有必要。

本研究以渭河流域作为研究区域,解析不同时空尺度下蒸散发的变化趋势;并基于 Budyko 模型,探究 Budyko 参数与水文气象、植被、土地利用类型、社会经济活动和土壤水的耦合关系,构建适用于该地区的水热耦合控制参数的模型;探讨气候变化和人类活动变化对于 Budyko 参数和蒸散发的影响,为定量归因该地区蒸散发变化提供科学依据。研究成果在一定程度上阐明变化环境下蒸散发变化的过程,对于该区域合理利用水资源和生态环境保护具有一定的指导意义。

1 研究区概况

渭河流域地处黄土高原中南部,景观类型复杂,是黄河流域水沙管理的重要区域,也是国家植被恢复重点区域。其大致位于东经 $103^{\circ}57'—110^{\circ}27'$ 和北纬 $33^{\circ}40'—37^{\circ}26'$,地势总体上由西北向东南递减^[11]。渭河是黄河最大的支流,因其水土流失严重,生态环境脆弱,所以在黄土高原实施生态治理时,渭河流域是最早一批实施治理的区域。自 1999 年以来,渭河流域的生态环境得到了改善,植被覆盖度呈增加趋势,渭河流域植被丰富,现有林地面积约 3.96 万 km^2 ,占流域总土地面积的 29.4% ^[12]。渭河流域年径流量为 100.5 亿 m^3 ,其中北洛河流域年径流量为 9.24 亿 m^3 ,泾河流域年径流量 20 亿 m^3 。本论文选取渭河流域为研究区,将其分为渭河干流上中下游、泾河和北洛河 5 个子流域。

2 数据与方法

2.1 数据来源

水文数据均来源于中华人民共和国水文年鉴黄

河流域水文年鉴及黄河水利委员会,包括渭河流域干支流 5 个控制水文站 1990—2020 年的逐月实测径流量资料,分别为林家村、咸阳、华县、张家山和状头。其中,林家村水文站的月径流数据只到 2018 年 12 月。各水文站位置见图 1。气象资料来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),主要包含了渭河流域及周边共 26 个气象站 1990—2020 年的逐日降水、气温(日平均、日最低及日最高气温)、气压(日平均、日最低及日最高气温)、相对湿度、日照时数、风速(日平均、极大及最大风速)、风向等资料^[13]。根据邻近站点进行差值获得缺失的日尺度数据。将 26 个气象站的日尺度数据通过累加得到月、年尺度降雨数据。研究中所涉及到的各区域面降雨量和面气温数据,根据泰森多边形法经面积加权计算而来。

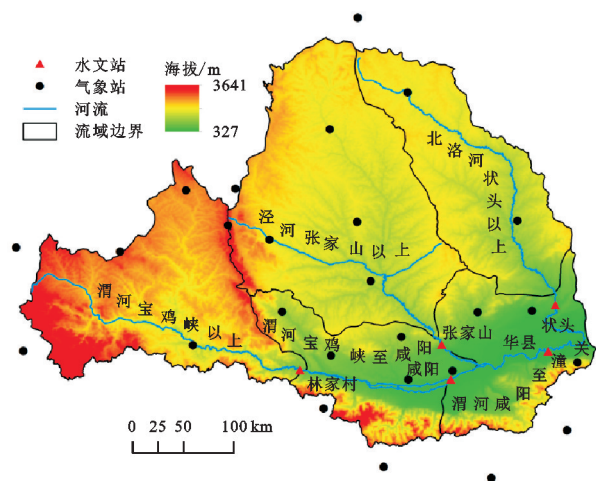


图 1 研究流域位置以及水文站

Fig. 1 Location of the study watershed and hydrographic stations

GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam Model)是由荷兰阿姆斯特丹大学和根特大学联合研发的全球陆地蒸散发产品(<https://www.gleam.eu/>),其在黄河、海河等流域综合表现较好^[14]。该数据的空间分辨率为 0.25° ,原始数据为 nc 格式,转化为 tif 格式后,再对其进行投影、拼接、重采样等处理,得到 30 m 分辨率的逐年实际蒸散发数据。

植被归一化指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据来源于国家科技资源共享服务平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)提供的中国 5 km 分辨率逐月 NDVI 数据集,时间尺度为 1990—2020 年^[15],采用最大合成法合成月 NDVI,再计算年均 NDVI。由于该数据集部分月份存在 0 值和极小值等异常值,本研究对其进行剔除,以提高数据的准确度。

土壤水数据来源于 ERA5-Land 陆面高分辨率再分析数据(<https://cds.climate.copernicus.eu>),时

间分辨率为 1 h,空间分辨率为 30 km,本研究选取了 0—100 cm 深度的土壤层含水量,单位为 m^3/m^3 。通过对小时数据计算得到日数据、月数据和年数据。

土地利用类型数据来源于武汉大学杨杰等的《The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1990 to 2020》(Version 1.0.0)^[16]。经计算分别得到 5 个子流域农田、森林、灌木、草地和不透水面 5 种土地类型面积所占百分比。

选取 1990—2020 年人口、GDP、耕地面积和有效灌溉面积作为社会经济指标,该研究数据来源于中国社会经济大数据研究平台(<https://data.cnki.net/>)的各省市统计年鉴和各地区的《中国统计年鉴》。使用面积权重法将行政尺度的社会经济数据转换为流域尺度。

2.2 研究方法

2.2.1 Budyko 模型 Budyko 模型基于流域水热平衡提出的水分能量耦合方程,水热平衡方程如下:

$$R = P - ET - \Delta S \quad (1)$$

式中: R 为流域多年平均径流深(mm); P 为流域多年平均降水量(mm); ET 为流域多年实际蒸散发(mm); ΔS 为蓄水量变化(mm);在多年尺度下 ΔS 可忽略不计。不断有学者将自然地理和下垫面参数等属性引入到 Budyko 模型,并提出了诸多经验公式。本研究选取 Choudhury-Yang 方程对渭河流域实际蒸散发进行模拟分析,其公式如下:

$$ET = \frac{P + ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (2)$$

式中: ET 为流域多年实际蒸散发(mm); P 为流域多年平均降水量(mm); ET_0 为潜在蒸散发(mm),采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算得到; n 为综合反映下垫面情况的无量纲参数(简称下垫面参数),其值与地形、土壤、植被覆盖和土地利用等一系列因素有关。

2.2.2 一元线性回归法 为了研究蒸散发在空间上的格局和变化趋势,采用一元线性回归法计算 1990—2020 年每个栅格区域实际蒸散发的变化趋势,得到其线性趋势 θ_{slope} ,即实际蒸散发的趋势,该值为正表示实际蒸散发增加,相反则表示减少^[17]。采用 F 检验进行趋势显著性检验,根据给定像素的显著性水平分为 5 类,分别是极显著的增加(ESI)或减少(ESD)($p < 0.01$),显著的增加(SI)或减少(SD)($0.01 < p < 0.05$),或无显著变化(NSC)($p > 0.05$)^[18]。

2.2.3 TFPW-MK 趋势检验 即预置白方法(the trend-free pre-whitening, TFPW),它会根据气象序列是否自相关而选择性地剔除,所以对剔除自相

关数据后的序列进行检验相比传统的 Mann-Kendall 趋势检验误差更小。因此,本文采用预置白方法对序列进行预处理,以剔除原始序列的自相关性,然后再对新序列进行 Mann-Kendall 趋势检验^[19]。

2.2.4 Pettitt 突变检验 该方法起源于 Pettitt,常用于寻找水文气象要素序列中的突变点^[20]。由于其统计量的最大值唯一,因此能够确定突变发生的确切时间。蓄水量变化 ΔS 本身很小,甚至在年尺度上可以忽略不计。因此,本文仅在计算蒸散发突变点时忽略蓄水量变化。

2.2.5 逐步多元线性回归 通过计算各驱动因素与水热参数 n 的皮尔逊相关系数初步筛选出和参数 n 显著相关的驱动要素。再将筛选出的驱动要素与参数 n 进行线性、指数、对数 3 种函数的拟合,找到最佳函数关系 $f(x_i)$ 。然后将参数 n 与各驱动要素之间的新函数关系作为新变量,经过逐步多元回归建立参数 n 的模型。在逐步多元线性回归建立过程中,为了避免各要素之间的多重共线性需将有强相关关系的驱动要素进行剔除。因此,使用方差膨胀要素 (Variance Inflation Factor) 来判断各要素间的多重共线性,VIF 越大,则共线性越强,VIF 越小,则共线性越弱。根据 Hair^[21] 建议,VIF 小于 10 时,不存在明显的共线性。最终,得到参数 n 的经验模型为:

$$n = a_1 f(x_1) + a_2 f(x_2) + \cdots + a_i f(x_i) + b \quad (3)$$

式中: a_i 表示 $f(x_i)$ 的系数; b 表示除了所选因素以外其他因素对 n 的影响。

2.2.6 模型精度验证 为保证拟合效果,对 5 个子流域参数 n 的经验公式进行交叉验证。将参数 n 值代入到 Budyko 公式,可以得到基于滑动 n 值模拟的多年实际蒸散发情况;同时基于研究时长推断出恒定 n 值代入到 Budyko 公式,可以得到恒定参数模拟的多年实际蒸散发;为验证两者模拟的结果和精度,将多年滑动平均作为观测值进行验证。本节采用纳什效率系数(NSE)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和决定系数(R^2)评价模拟效果。NSE 和 R^2 越接近于 1 表明模拟效果越好,RMSE 和 MAE 越接近于 0 表明模拟效果越好。

2.2.7 弹性系数法 实际蒸散发对各变量的敏感程度可以用弹性系数法计算,其定义为实际蒸散发对该变量的偏导数除以实际蒸散发与该变量的比值。则实际蒸散发对降水、潜在蒸散发和下垫面参数 n 的弹性系数可定义为:

$$\epsilon_{xi} = \frac{\partial ET}{\partial x_i} \times \frac{x_i}{ET} \quad (4)$$

式中: ϵ_{xi} 为实际蒸散发对 ET 对某一特定因素的弹性系

数; x_i 表示 P, ET_0, n 。若 $\epsilon_{xi} > 0$,则表明实际蒸散发随着该因子的增加而增加,若 $\epsilon_{xi} < 0$,则相反。 $|\epsilon_{xi}|$ 越大,则表明实际蒸散发对该因子的敏感程度越大。

同理,在计算 Budyko 公式中参数 n 对各驱动因子的敏感程度时也采用类似的计算方法,则参数 n 对各驱动因子的弹性系数可定义为:

$$\epsilon_{xi} = \frac{\partial n}{\partial x_i} \times \frac{x_i}{n} \quad (5)$$

式中: x_i 表示参数 n 经验模型中的某一因子。

2.2.8 蒸散发归因分析 假设实际蒸散发 ET 独立于 ET_0 ,且 ET_0 和 P 独立于 n ,则 ET 的变化可用全微分的形式表示为:

$$dET = \frac{\partial ET}{\partial P} dP + \frac{\partial ET}{\partial ET_0} dET_0 + \frac{\partial ET}{\partial n} dn \quad (6)$$

则某一变量 x 引起的实际蒸散发变化量可表示为:

$$dET_{xi} = \frac{\partial ET}{\partial x_i} dx_i \quad (7)$$

结合弹性系数计算公式,则有:

$$dET_{xi} = \frac{\partial ET}{\partial x_i} dx_i = \epsilon_{xi} \frac{ET}{x_i} dx_i \quad (8)$$

每个变量对实际蒸散发变化量的贡献率为:

$$C_{xi} = \frac{dET_{xi}}{dET} \times 100\% \quad (9)$$

式中: C_{xi} 为某要素对径流变化的贡献率; x_i 分别代表 P, ET_0, n 。

3 结果与分析

3.1 渭河流域蒸散发时空变化分析

对 GLEAM 实际蒸散发数据产品进行处理得到研究区 1990—2020 年实际蒸散发均值空间分布图 (图 2A)。由图可知,渭河流域实际蒸散发自东南向西北逐渐减少,表现出明显的空间异质性。实际蒸散发多年均值最高值位于秦岭北麓,属于半湿润区;最低位于黄土高原南面,该区域属于半干旱地区。实际蒸散发变化趋势范围为 -0.26 mm/a 到 5.25 mm/a ,整体呈上升趋势,仅有小部分地区呈现下降趋势,且这部分区域面积占总面积的比例小于 5%。从空间分布上看,北洛河流域上升趋势最大,渭河干流上升趋势最小。渭河流域 90% 的区域蒸散发显著增加,其中 71.6% 的区域极显著的增加 (ESI),18.4% 的区域显著增加 (SI);其余 10.0% 的地区无显著变化 (NSC),多集中于渭河干流中下游。由图 2D 可知,渭河流域实际蒸散发年均值在时间尺度上也呈现增加的趋势,其斜率为 1.98 mm/a 。

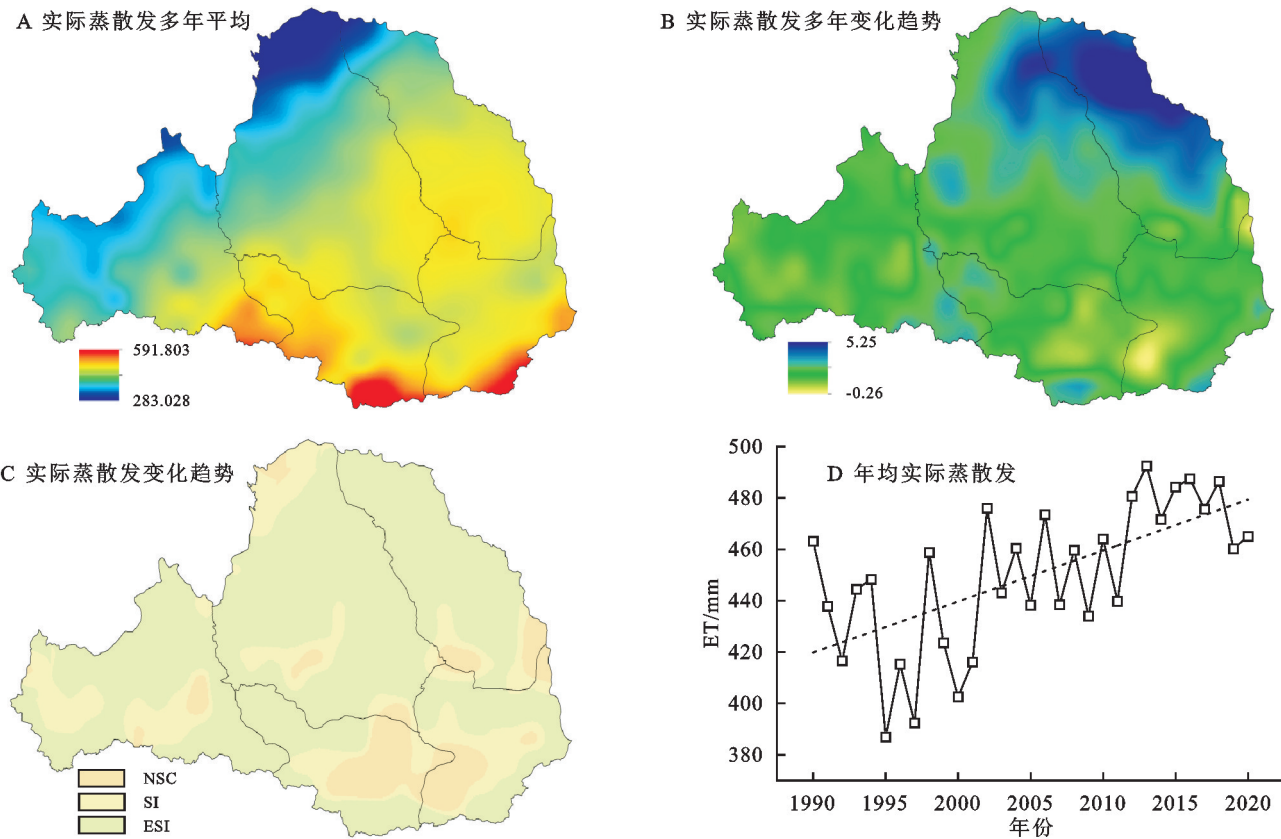


图 2 渭河流域蒸散发时空变化趋势

Fig. 2 The spatial trends of evapotranspiration distribution in Weihe River Basin

3.2 气象水文、植被、社会经济要素和土地利用类型趋势分析

1990—2020 年各驱动要素变化趋势如表 1 所示。5 个流域中的降水呈现增加趋势,有 3 个流域的径流呈现减小的趋势,ET₀ 无太明显的变化。在社会经济要素中,GDP 呈现显著增加,且增速非常快,人口呈现显著增加,这说明渭河流域社会经济得到了

快速发展;仅张家山和林家村水文站控制的流域耕地面积和灌溉面积均显著增加的趋势,其余流域均有减小的趋势。渭河流域农田用地呈现显著减小的趋势,NDVI 和森林用地呈现显著增加趋势,这可能与黄土高原开展“退耕还林(草)”工程有直接关系。灌木、草地无明显变化趋势,不透水面呈显著增加的趋势,年均土壤水呈现明显减小的趋势,但其斜率较小。

表 1 各驱动要素 1990—2020 年变化趋势

Table 1 The trend of each driving factor from 1990 to 2020

驱动要素		状头	张家山	林家村	咸阳	华县
降水(mm)	<i>P</i>	1.865	4.576 **	4.698 **	4.189 **	2.560
径流(mm)	<i>R</i>	−0.524 **	−0.379	−0.219	1.143	0.638
潜在蒸散发(mm)	ET ₀	0.042	−0.049	−0.102 *	−0.038 **	−0.145
GDP(亿元)	GDP	96.470 **	63.395 **	33.820 **	72.191 **	75.803 **
人口(万人)	pop	1.784 **	1.757 **	1.068 **	1.339 **	1.406 **
耕地面积(10 ³ hm ²)	<i>A</i> _{agr}	−1.039	6.531 **	5.488 **	−1.145	−1.202
有效灌溉面积(10 ³ hm ²)	<i>A</i> _{irr}	−0.069	2.223 **	1.664 **	−0.136 *	−0.142 *
归一化植被指数(10 ^{−2})	NDVI	0.356 **	0.291 **	0.324 **	0.309 **	0.237 **
农田(%)	LU _{crop}	−0.161 **	−0.311 **	−0.228 **	−0.303 **	−0.356 **
森林(%)	LU _{forest}	0.202 **	0.147 **	0.087 **	0.188 **	0.149 **
灌木(%)	LU _{shrub}	−0.008 **	−0.001	0.001 *	−0.005 **	−0.009 **
草地(%)	LU _{grass}	−0.044 *	0.168 **	0.112	−0.041	−0.094 **
不透水面(%)	LU _{imp}	0.014 **	0.012 **	0.014 **	0.157 **	0.306 **
土壤水(10 ^{−2} m ³ /m ³)	SW	−0.124 **	−0.111 **	−0.066 **	−0.102 **	−0.143 **

注: * 和 ** 分别表示通过了 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 显著性检验。

3.3 Budyko 参数 n 的时空特征和解析推导

使用 5 a 滑动平均的方法计算参数 n , 得到参数 n 的滑动值。图 3 为基于多年平均值得到的恒定参数 n 与基于多年滑动平均值得到的时变参数 n 的 annual 变化对比图。从图中可以看出在研究时段内, 时变参数 n 与固定参数 n 有着显著的差异。在研究时段内, 各流域的参数 n 均呈上升趋势, 这表明渭河流域的环境状况发生了明显的变化, 但不同流域又表现出不同的特征。例如北洛河流域(状头站)和泾河流域(张家山站)的参

数 n 整体呈现持续增加趋势, 均在 2006 年之前呈现先增加后减小, 此后持续波动增加的趋势, 整个过程 n 的取值较大; 渭河宝鸡峡以上流域(林家村站)参数 n 值变化较为平缓且取值较小; 渭河宝鸡峡至咸阳(咸阳站)和咸阳至潼关流域(华县站)两流域参数 n 呈先上升后下降的趋势, 整个过程呈跳跃式变化。以上结果表明不同流域的下垫面情况变化特征具有明显差异, 为弄清这一差异, 还需进一步分析可能对下垫面情况有重要影响的驱动因子的变化特征。

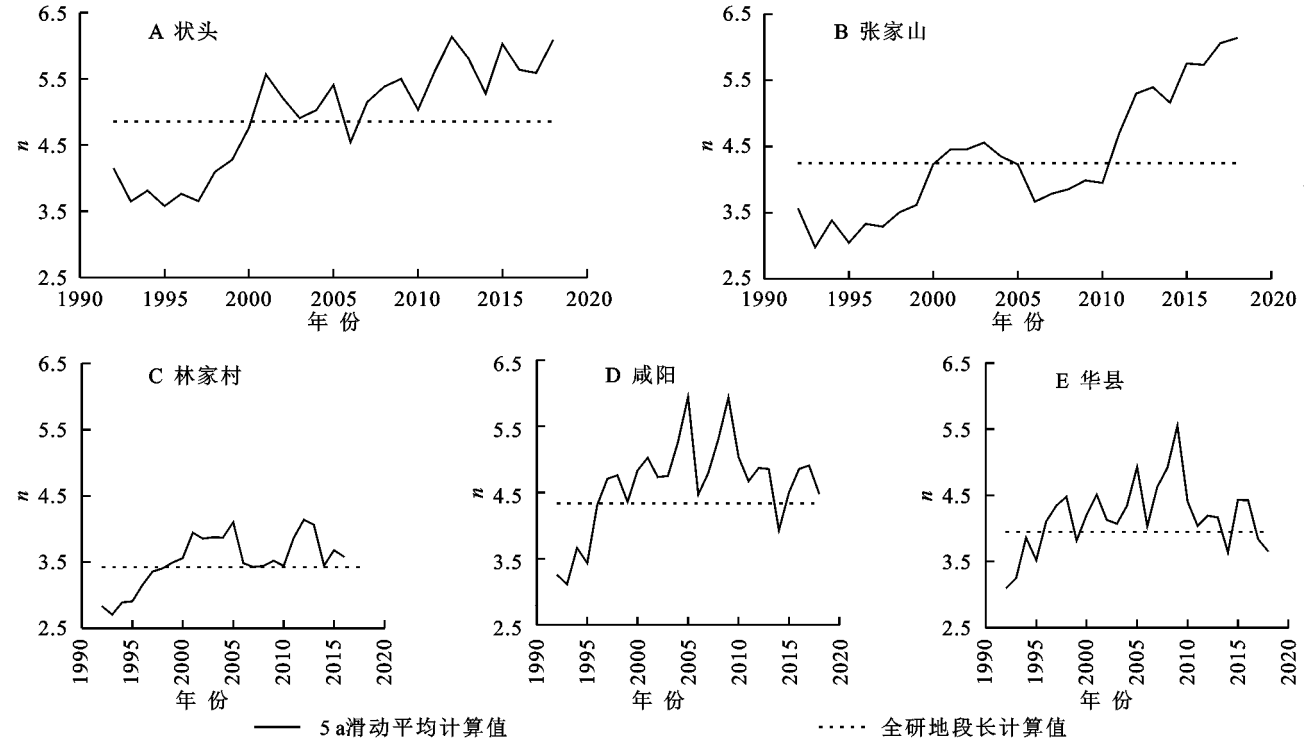


图 3 渭河流域参数 n

Fig. 3 The parameter n of Weihe River Basin

经过逐步多元回归建立各驱动要素与参数 n 的模拟关系, 剔除共线要素后, 得到渭河流域水热参数 n 的经验模型表达式, 如表 2 所示。由表可知, 状头和张家山水文站控制的流域参数 n 的拟合精度 R^2 高达 0.79 以上, 其他流域的 RMSE 最大不超 0.57,

逐步回归整体模拟效果较好。从各流域驱动因素入选情况来看, NDVI、GDP、人口、耕地面积和草地先后入选到参数 n 的经验模型中, 其中 NDVI 和人口入选次数较多, 说明这两个驱动要素对渭河流域实际蒸散发有着重要的影响。

表 2 各流域参数 n 的经验模型

Table 2 Empirical model of parameter n for all the basins

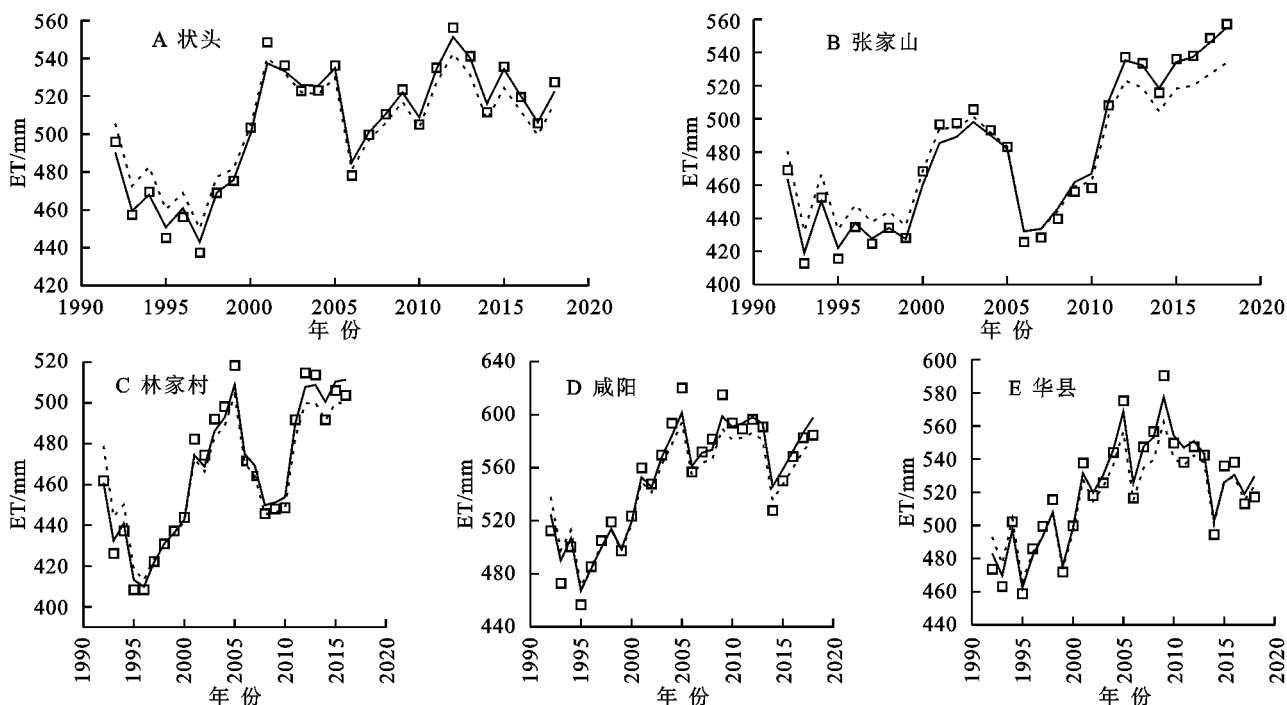
水文站	参数 n 的模型	RMSE	R^2
状头	$n = 21.7158NDVI_{mean} - 3.6339$	0.3797	0.7906
张家山	$n = 11.2823NDVI_{mean} + 1.0578 \times 10^{-3}GDP + 0.0102$	0.4005	0.8306
林家村	$n = 7.3479lnpop - 36.0365$	0.2641	0.5804
咸阳	$n = 11.8499lnpop - 63.4099$	0.5626	0.3530
华县	$n = -0.0064agr - 0.3157LU_{grass} + 7.1582$	0.3970	0.4647

将构建的时变参数 n 的经验模型和恒定参数 n 分别代入 Budyko 方程式计算模拟蒸散发, 对两种参数 n 计算得到结果和精度做对比, 得到图 4 和表 3。从图 4 中可以看出时变参数 n 的经验模型模拟的蒸

散发比多年平均恒定参数 n 模拟的蒸散发更能与实际蒸散发(5 a 滑动均值)吻合。由表 3 可知, 各流域时变参数经验模型模拟蒸散发的 NSE 均高于恒定参数模拟的 NSE; 时变参数经验模型模拟结果的均方

根误差 RMSE 和平均绝对误差 MAE 均小于恒定参数模型模拟结果的均方根误差 RMSE 和平均绝对误差 MAE。时变参数经验模型模拟结果的 R^2 整体优于恒定参数模拟的 R^2 。以上结果表明,基于时变参

数 n 经验模型模拟的蒸散发能够较为准确地模拟年际蒸散发的变化特征,且模拟效果优于恒定参数 n 模拟的蒸散发。因此,参数 n 的经验模型可被用于实际蒸散发模拟和归因分析。



注:实线代表时变参数 n 模拟实际蒸散发,虚线代表恒定参数 n 模拟实际蒸散发,黑点表示滑动平均实际蒸散发。

图 4 基于时变参数 n 模拟实际蒸散发和基于恒定参数 n 模拟实际蒸散发与滑动平均实际蒸散发的比较

Fig. 4 Comparison of the simulated actual evapotranspiration with time-varying parameter n and constant parameter n to the multi-year moving average evapotranspiration

表 3 时变参数 n 模型和恒定参数 n 模型实际蒸散发模拟效果的对比

Table 3 Comparison of evapotranspiration simulation effect between time-varying parameter n model and constant parameter n model

水文站	时变 n 经验模型模拟精度				恒定 n 模拟精度			
	NSE	RMSE	MAE	R^2	NSE	RMSE	MAE	R^2
状头	0.985	3.955	3.048	0.989	0.927	8.752	7.628	0.982
张家山	0.987	5.110	4.223	0.989	0.928	12.024	9.926	0.987
林家村	0.977	5.103	4.394	0.979	0.929	8.980	6.826	0.955
咸阳	0.959	8.971	7.106	0.963	0.915	12.909	10.555	0.958
华县	0.958	6.666	5.780	0.960	0.898	10.384	8.183	0.959

3.4 实际蒸散发和参数 n 的敏感性分析

基于各流域 1990—2020 年多年平均降水、径流、潜在蒸散发和全时长 n 值,计算实际蒸散发对各要素弹性系数,结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出,影响实际蒸散发的所有要素的弹性系数均为正值,其中降水的弹性系数最大,在 0.66~0.79 之间,这表明降水每增加 1%,实际蒸散发会增加 0.66%~0.79%。在各流域中,实际蒸散发对降水和潜在蒸散发的敏感程度较高,对下垫面参数的弹性系数比较小;由于潜在蒸散发的计算是由各气象因子得来,其多年变化较小。因此,研究渭河流域的实际蒸散发应对降水和下垫面各驱动因子进行分析。

为了进一步探究参数 n 对各驱动因子对的响

应,利用公式(5)求得各流域参数 n 的弹性系数,结果如表 5 所示。由表 5 可知,参数 n 对人口最敏感,其敏感系数高达 2.73,这表明子流域人口每增加 1%,参数 n 就会增加 2.73%,说明人口对下垫面环境的影响最大。其次, n 对 NDVI 较为敏感,弹性系数高达 0.84~1.74。参数 n 随耕地面积和草地占比的增大而减小,两者的弹性系数分别为 -0.48 和 -0.30。此外,参数 n 还受 GDP 的影响,但对其敏感程度较小。造成这一结果的原因可能是在研究时段内渭河流域社会经济得到的发展,人口增速较快,地区环境进一步恶化,所以才开展了“退耕还林(草)”的政策进一步缓解发展对环境的破坏,这对下垫面参数产生了一定的影响^[22]。

表 4 多年平均 ET,P,ET₀和 n 值,以及 ET,P,ET₀和 n 的弹性系数

Table 4 The average value of ET, P, ET₀ and the value of n, and the elasticity coefficients of ET to the P, ET₀ and n

水文站	ET	P	ET ₀	n	ε _P	ε _{ET₀}	ε _n
状头	506.42	531.12	700.81	4.86	0.79	0.21	0.10
张家山	485.66	512.92	703.70	4.25	0.79	0.21	0.12
林家村	472.44	512.48	713.58	3.43	0.76	0.24	0.16
咸阳	554.63	611.26	709.31	4.34	0.66	0.34	0.15
华县	518.38	564.93	710.57	3.95	0.71	0.29	0.15

表 5 各流域参数 n 对驱动因子的弹性系数

Table 5 The elastic coefficient of each basin parameter n to the driving factors

水文站	ε _{NDVI_{mean}}	ε _{GDP}	ε _{pop}	ε _{agr}	ε _{LU_{grass}}
状头	1.74				
张家山	0.84	0.15			
林家村			2.14		
咸阳			2.73		
华县				-0.48	-0.30

为了解基准期和突变期两个时期各项要素变化情况,用后者减去前者得到表 6。由表 6 可知,各流

域多年平均实际蒸散发和降水均明显增加,而潜在蒸散发变化不明显,原因系潜在蒸散发主要依据净辐射等能量指标,其在几十年的时间内变化很小,说明渭河流域气候较为稳定。突变期的参数 n 均高于基准期,状头和张家山控制流域参数 n 的变化较大,这表明两流域下垫面性质发生了较为显著的变化。仅咸阳、华县水文站控制的流域降水和潜在蒸散发弹性系数变化较明显,其余弹性系数变化很小,说明整体上渭河流域实际蒸散发对各因子的敏感程度较为稳定,但流域间略有差异。

表 6 实际蒸散发突变期各要素和弹性系数的变化

Table 6 The changes of factors and elastic coefficients in actual evapotranspiration mutation period

水文站	突变年	ΔET	ΔP	ΔET ₀	Δn	Δε _P	Δε _{ET₀}	Δε _n
状头	1999	58.47	51.75	1.51	1.61	0.00	0.00	-0.04
张家山	2000	66.10	60.26	-0.41	1.44	0.00	0.00	-0.04
林家村	2002	60.78	65.13	-1.58	0.69	-0.04	0.04	-0.02
咸阳	2002	89.64	114.37	-1.13	1.11	-0.15	0.15	-0.01
华县	2002	63.71	78.44	-2.54	0.63	-0.08	0.08	0.00

3.5 实际蒸散发归因分析

渭河流域各要素对实际蒸散发变化的贡献率如表 7 所示。总体上看,降水对蒸散发的影响最大,其次是下垫面参数 n,潜在蒸散发的贡献率最小。在流域尺度上,降水对华县水文站控制的流域的影响最大,贡献率高达 81.50%,其余流域也都达到了 65%以上。状头和张家山水文站控制流域的下垫面参数的贡献率较大,高达 1/3 左右,其中 NDVI 对该流域

实际蒸散发的贡献率高达 33.92%,这主要是因为该流域植被逐步得到改善,蒸腾作用增大的结果^[23]。人口对实际蒸散发的贡献率高达 22.69%以上,其次是 GDP 对流域的贡献率高达 19.13,这说明流域内社会经济的快速发展,人口迅速增长,影响了流域地表情况^[24]。华县水文站控制流域草地和耕地面积的贡献率分别为 17.11%,2.22%,造成这一结果的主要原因和该地区“退耕还林(草)”工程有关。

表 7 各驱动因素对蒸散发的贡献率

Table 7 Contribution rate of each driving factor to evapotranspiration

水文站	P	ET ₀	n	NDVI _{mean}	GDP	pop	agr	LU _{grass}
状头	65.71	0.37	33.92	33.92				
张家山	67.37	-0.09	32.71	13.58	19.13			
林家村	74.80	-0.42	25.62			25.62		
咸阳	77.65	-0.34	22.69			22.69		
华县	81.50	-0.83	19.33				2.22	17.11

为了更准确地判读变化环境下蒸散发变化的原因,对年际尺度上的蒸散发变化进行了归因分析。基于滑动平均得到的 1992—2018 年气候变化和人类活动要素的多年滑动平均值,以 1992 年为基准期,之后每一年设置成变化期,得到逐年实际蒸散发变化归因结果,如图 5 所示。各流域气候变化和人类活动对蒸散发的影响机制不同,但总体上,在两者的影响下实际蒸散发始终在增加。整体上气候变化在 2000 年之前

均有使实际蒸散发减少的现象,但是在随后的时间里都对蒸散发起到正向贡献。人类活动对不同流域蒸散发贡献的变化趋势不同,其中人类活动对北洛河流域和泾河流域的蒸散发的正向贡献一直处于缓慢增加的趋势,其他流域呈现波动增加的趋势。虽然人类活动导致的蒸散发变化量始终小于气候变化所致,但其贡献量正在逐年与气候变化接近甚至超过,这表明人类活动在实际蒸散发中发挥的作用越来越明显^[25]。

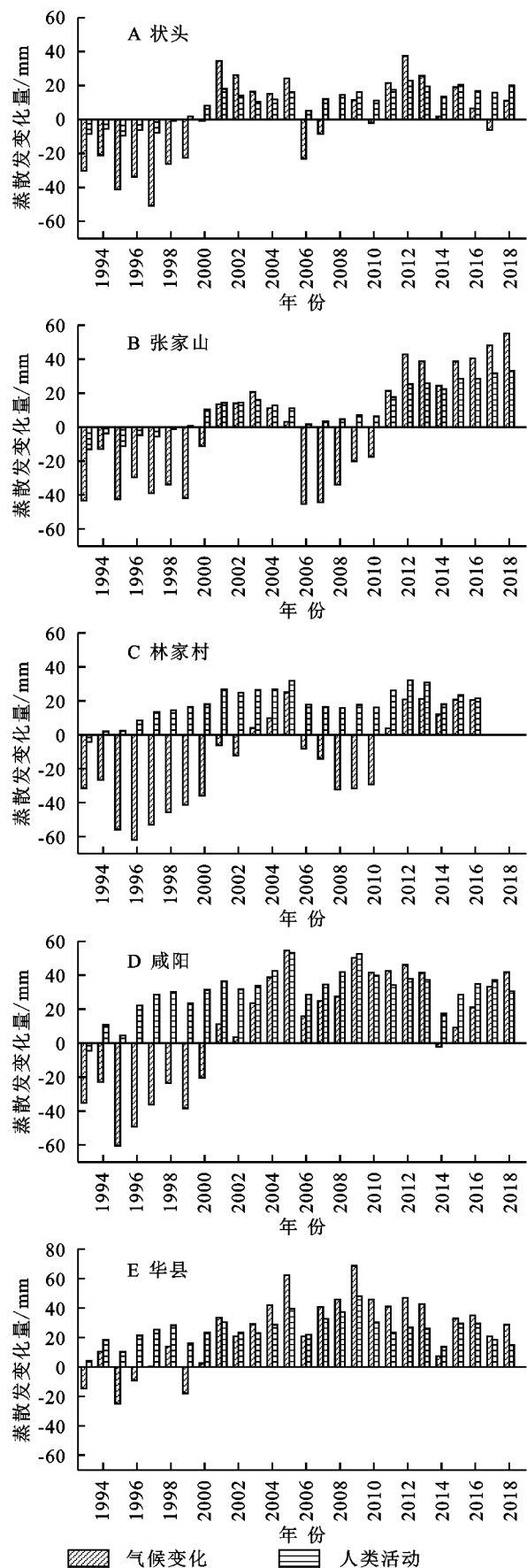


图 5 气候变化和人类活动导致的实际蒸散发变化量

Fig. 5 Actual evapotranspiration changes due to climate change and human activities

4 讨论

本研究结果表明 1990—2020 年渭河流域实际蒸散发呈现显著增长的趋势,但存在空间异质性,表现为自东南向西北逐渐减少,这与徐瑞瑞^[26]的研究结果一致。这种空间格局说明降水可能是影响蒸散发大小的一个重要因素。

研究时段内渭河流域参数 n 均呈上升趋势,王飞宇^[27]、王卫光等^[28]的研究也有相同的趋势,但不同流域又表现出不同的特征。在多元逐步回归前,引入线性、指数、对数 3 种函数可以提高水热参数 n 经验模型的泛化能力。参数 n 与该地区的 NDVI、人口、耕地面积、土地利用/覆被和 GDP 等因素密切相关,这与 Wang 等的研究一致^[22]。在对蒸散发模拟时,时变参数 n 经验模型模拟结果整体优于恒定参数 n ,这一结论同样适用于模拟径流^[29]。在对渭河流域蒸散发敏感性分析中,降水、潜在蒸散发、参数 n 的弹性系数均为正值,蒸散发对降水最敏感,对下垫面参数 n 最不敏感。参数 n 对各驱动因子的敏感程度依次为 NDVI、人口、耕地面积、草地占比、GDP。其中,参数 n 对耕地面积和草地的弹性系数为负。渭河流域降水对蒸散发的贡献最大,其次是下垫面参数,潜在蒸散发的贡献最小,这与 He 等的研究结论一致^[30]。渭河流域下垫面参数的贡献率最高可达三分之一左右,其中人口贡献率高达 33.92%,森林用地占贡献率高达 32.71%,NDVI 贡献率高达 19% 以上,这表明渭河流域下垫面参数对蒸散发有着重要的影响。各流域气候变化和人类活动对蒸散发影响机制不同,气候变化对蒸散发的贡献量由负转为正并逐年增加,在年际蒸散发贡献量中因气候变化引起的贡献量占绝大部分。人类活动对蒸散发的贡献量呈波动增长的趋势,这表明渭河流域人类活动在实际蒸散发变化中发挥的作用越来越明显,王丽霞和 Wu 等也得出了相同的结论^[25,31]。

实验表明,渭河流域蒸散发在气候和下垫面各驱动因子的共同作用下发生改变。一方面,渭河流域的降水呈现增加的趋势,其中 3 个流域为显著增加;另一方面,由于社会的发展,渭河流域下垫面参数发生了剧烈的变化,GDP 和人口不断增加,对区域生态的需求变大,土地利用发生了巨大的改变,但是由于渭河流域是开展“退耕还林(草)”工程的重点区域,使得流域内植被得到了极大的改善,植物的蒸腾作用对蒸散发起着促进作用,这些因素都导致渭河流域实际蒸散发增加。本研究虽然选取了较多的驱动因子,但在计算过程中假设各驱动因素是相互独立的,未能去探究各驱动因子之

间的相互影响。下垫面因子对蒸散发的影响很复杂,在后续的研究中还可以考虑地形、地貌、建筑面积等下垫面要素,能够更好地反映下垫面参数。

5 结论

本研究选取典型的半干旱半湿润地区渭河流域,从时空尺度上分析了渭河不同流域的水文气象要素、植被要素和人类活动要素的变化趋势,构建了 Budyko 参数耦合模型,探究了各因素对渭河各流域实际蒸散发的影响,主要结论如下:

(1) 1990—2020 年渭河流域实际蒸散发呈现显著增长的趋势,但存在空间异质性,表现为自东南向西北逐渐减少。渭河流域 90% 的区域蒸散发显著增加,整体增速为 1.98 mm/a。

(2) 渭河流域下垫面参数 n 随时间变化有变大的趋势,参数 n 与该地区的 NDVI、GDP、人口、耕地面积和土地利用/覆被等因素相关性较高。在对蒸散发模拟时,时变参数 n 经验模型模拟结果整体优于恒定参数 n 。

(3) 渭河流域蒸散发对降水的最敏感,下垫面参数 n 对 NDVI 最敏感。降水对蒸散发的贡献最大,其次是下垫面参数 n 中的各因子,其中以 NDVI 和人口的贡献较大,潜在蒸散发的贡献最小。人类活动导致的蒸散发变化量正在逐年与气候变化引起的蒸散发变化量接近甚至超过,人类活动对蒸散发的影响越来越明显。

参考文献(References):

- [1] Zhao J F, Li C, Yang T Y, et al. Estimation of high spatiotemporal resolution actual evapotranspiration by combining the SWH model with the METRIC model[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124883.
- [2] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [3] Yang Z L, Bai P, Li Y Z. Quantifying the effect of vegetation greening on evapotranspiration and its components on the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128446.
- [4] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1345-1346.
- [5] 孙睿, 刘昌明. 地表水热通量研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(3): 434-438.
Sun R, Liu C M. A review on research of land surface water and heat fluxes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(3): 434-438.
- [6] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467: 43-51.
- [7] 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 Water Science*, 2016, 27(4): 492-500.
- [8] 魏红义, 李靖, 王江, 等. 渭河流域径流变化趋势及其影响因素分析[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 76-80.
Wei H Y, Li J, Wang J, et al. Analysis on runoff trend and influence factors in Weihe River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1): 76-80.
- [9] 和宛琳, 徐宗学. 渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势分析[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(1): 102-106.
He W L, Xu Z X. Spatial and temporal characteristics of the long-term trend for temperature and pan evaporation in the Wei River Basin[J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2006, 42(1): 102-106.
- [10] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(4): 409-416.
Sun F B, Yang D W, Liu Z Y, et al. Study on coupled water-energy balance in Yellow River Basin based on Budyko Hypothesis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(4): 409-416.
- [11] 程三友, 王红梅, 李英杰. 渭河水系流域地貌特征及其成因分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(3): 45-49.
Cheng S Y, Wang H M, Li Y J. Geomorphology characteristics of the Wei River Basin and its formation reasons[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 27(3): 45-49.
- [12] 张耀文, 张勃, 姚荣鹏, 等. 2000—2020 年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 223-233.
Zhang Y W, Zhang B, Yao R P, et al. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and water production in the Weihe River Basin from 2000 to 2020[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(2): 223-233.
- [13] 陶国通, 王景雷, 南纪琴, 等. 基于温度的作物需水量估算方法[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2019-2025.
Tao G T, Wang J L, Nan J Q, et al. Calculating method for crop water requirement based on air temperature[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 2019-2025.
- [14] 杨秀芹, 王国杰, 潘欣, 等. 基于 GLEAM 遥感模型的中国 1980—2011 年地表蒸散发时空变化[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 132-141.
Yang X Q, Wang G J, Pan X, et al. Spatio-temporal

- variability of terrestrial evapotranspiration in China from 1980 to 2011 based on GLEAM data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(21):132-141.
- [15] 徐洋,杨雅萍.1982—2020年中国5 km分辨率逐月NDVI数据集[J].中国科学数据,2022,7(1):99-107.
Xu Y, Yang Y P. A 5 km resolution dataset of monthly NDVI product of China (1982—2020) [J]. China Scientific Data, 2022,7(1):99-107.
- [16] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.
- [17] 谢宝妮,秦占飞,王洋,等.黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素[J].农业工程学报,2014,30(11):244-253.
Xie B N, Qin Z F, Wang Y, et al. Spatial and temporal variation in terrestrial net primary productivity on Chinese Loess Plateau and its influential factors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(11):244-253.
- [18] Ning T T, Liu W Z, Lin W, et al. NDVI variation and its responses to climate change on the northern Loess Plateau of China from 1998 to 2012[J]. Advances in Meteorology, 2015,2015:725427.
- [19] 张洪波,王斌,辛琛,等.去趋势预置白方法对径流序列趋势检验的影响[J].水力发电学报,2016,35(12):56-69.
Zhang H B, Wang B, Xin C, et al. Effects of trend-free pre-whitening methods on trend detection in Mann-Kendall test of runoff series [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016,35(12):56-69.
- [20] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 1979,28(2):126-135.
- [21] Hair J F, Black W B, Babin B J, et al. Multivariate Data Analysis[M]. Kent: Prentice Hall, 2009.
- [22] Wang F Y, Xia J, Zou L, et al. Estimation of time-varying parameter in Budyko framework using long short-term memory network over the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2022,607:127571.
- [23] 张芳宁,杨亮洁,杨永春.1981—2016年黄土高原植被NDVI变化及对气候和人类活动的响应[J].水土保持研究,2023,30(2):230-237.
Zhang F N, Yang L J, Yang Y C. Change of vegetation NDVI and its response to climatic and human activities in the Loess Plateau during 1981—2016[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):230-237.
- [24] Deng W J, Song J X, Sun H T, et al. Isolating of climate and land surface contribution to basin runoff variability: A case study from the Weihe River Basin, China[J]. Ecological Engineering, 2020,153:105904.
- [25] 王丽霞,夏鹏宇,杨潇,等.渭河流域蒸散发时空反演及其对人类活动的响应[J].水利水电技术(中英文), 2023,54(12):120-132.
Wang L X, Xia P Y, Yang X, et al. Spatial-temporal inversion of evapotranspiration in the Weihe River Basin and its response to human activities[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(12):120-132.
- [26] 徐瑞瑞.渭河流域实际蒸散发的时空变异研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
Xu R R. Spatio-Temporal Variation of Actual Evapotranspiration in the Wei River[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [27] 王飞宇.时变 Budyko 框架下黄土高原中部径流变化及其归因分析[D].西安:陕西师范大学,2022.
Wang F Y. Runoff change and its attribution analysis in the central Loess Plateau under the time-varying Budyko framework [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2022.
- [28] 王卫光,陆文君,邢万秋,等.黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J].水资源保护,2018,34(2):7-13.
Wang W G, Lu W J, Xing W Q, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2018,34(2):7-13.
- [29] Sun X Y, Dong Q J, Zhang X. Attribution analysis of runoff change based on Budyko-type model with time-varying parameters for the Lhasa River Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023,48:101469.
- [30] He G H, Zhao Y, Wang J H, et al. Attribution analysis based on Budyko hypothesis for land evapotranspiration change in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2019,11(6):939-953.
- [31] Wu H S, Liu D F, Chang J X, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff in Weihe Basin based on Budyko hypothesis [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 82: 012063.