

赵雯颖, 鞠琴, 蔡辉艺, 等. 渭河流域多时间尺度径流变化特征及主控因子[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 24-32.
ZHAO W J, JU Q, CAI H Y, et al. Multi-time scale characteristics and dominant control factors of runoff in the Weihe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 24-32. (in Chinese)

渭河流域多时间尺度径流变化特征及主控因子

赵雯颖^{1,2}, 鞠琴^{1,2}, 蔡辉艺³, 唐志阳^{1,2}, 史启书^{1,2}, 汪柔汐^{1,2}, 李思锐^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098; 2. 水安全与水科学协同创新中心, 南京 210098;
3. 福州市规划设计研究院集团有限公司, 福州 350108)

摘要: 为研究变化环境下渭河流域多时间尺度径流变化特征及影响因素, 基于渭河流域咸阳水文站 1961—2015 年实测径流量数据, 分析不同时间尺度上径流的变化趋势, 并选取多个气象要素与归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)构建向量自回归(vector autoregression, VAR)模型, 量化各影响因素对径流变化的贡献程度, 探讨全年、汛期和非汛期径流变化主控因子的差异性。结果表明, 1961—2015 年渭河流域径流整体呈下降趋势, 汛期径流量占比为 65.5%。在年代尺度上径流的丰枯变化存在差异, 1970—1979 年和 1990—1999 年径流量呈显著减少趋势; 影响汛期和全年尺度径流变化的主控因子均为降水, 贡献率达 50%, 其次是太阳辐射, 在汛期和全年的贡献率分别为 14.37%、18.45%。非汛期影响径流变化的主控因子为 NDVI(贡献率 30.08%)与太阳辐射(贡献率 30.05%), 且 NDVI 对径流变化的滞后效应更明显, 其他因子贡献大小依次为降水、空气比湿、气温。

关键词: 径流; 向量自回归模型; NDVI; 主控因子; 渭河流域

中图分类号: TV121 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0003

随着全球气候变暖, 气候变化加剧了对水文循环的影响^[1]。受到气候变化和下垫面变化的共同影响, 地表径流发生了显著变化, 且演变特征表现出时空异质性^[2]。国内外很多学者对全球或者区域尺度的径流演变趋势及其影响因素进行了研究。刘纯^[3]认为渭河流域各站点年径流量均呈下降趋势, 并在 20 世纪 90 年代出现变异, 下垫面条件和气象要素也变化显著^[4]。Li 等^[5]基于 Budyko 假说分析, 认为黄河流域径流对降水变化最敏感, 而径流减少的最主要原因是由人类活动引起的植被变化。刘引鸽等^[6]认为渭河流域上游径流量与气温、日照时间和蒸发量呈显著负相关, 与降水成显著正相关。刘蕊蕊^[7]利用分离评判法和 VIC 模型分析认为以气温和降水为主的气候变化是渭河流域径流量减少的主要原因。向量自回归(vector autoregression, VAR)模型能够描述多个变量之间的相互依赖关系,

包括变量之间存在的滞后效应以及因果关系, 在经济、环境科学等领域量化影响因素的贡献程度中得到了广泛应用。在水文领域中, 李艺珍等^[8]采用 VAR 模型分析了新疆金沟河气象要素与径流间的关系及冲击响应, 赵娟等^[9]采用 VAR 模型评价了黄河支流降水和水土保持措施对径流变化的长期作用。利用 VAR 模型可以对径流的影响因子进行重要性排序, 从而选出径流的主控因子。

径流在水文循环中发挥着重要的平衡和调节作用, 渭河是黄河流域来水最多的一级支流, 也是关中地区供水、农业灌溉、工业用水等最重要的水资源供给区。近年来, 随着气候变化与人类活动强度加剧, 渭河流域生态环境较为脆弱, 水文情势也发生了不同程度改变^[10]。针对渭河流域径流变化的研究主要侧重于年际、年内尺度分析, 而从汛期和非汛期尺度来分析径流变化规律的研究相对较少, 尤

收稿日期: 2023-07-13 修回日期: 2023-11-21 网络出版时间: 2024-01-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240109.0940.010>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201104); 江苏省研究生科研创新与实践创新项目(422003285); 江苏省大学生创新创业项目(202310294176Y; 202310294012Z)

作者简介: 赵雯颖(1998—), 女, 安徽宿州人, 主要从事水文物理规律及水文预报研究。E-mail: zwjie_val@163.com

通信作者: 鞠琴(1980—), 女, 江苏泰兴人, 副教授, 博士, 主要从事气候变化下水文响应研究。E-mail: juqin@hhu.edu.cn

其径流变化在汛期和非汛期的主控因子是否一致亟须进一步深入研究。为更好认识气象要素、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与径流之间的响应关系,从年代际、汛期、非汛期多个时间尺度对变化环境下渭河流域的径流变化趋势进行全面的分析。通过构建径流的VAR模型,研究多时间尺度下气候与下垫面条件影响径流变化的主控因子,定量分析不同影响因素对渭河流域径流变化影响过程与贡献程度,揭示影响因子对径流的长期作用,旨在为渭河流域水资源规划以及流域生态环境管理提供理论支持。

1 研究区概况

渭河发源于甘肃省渭源县,是黄河流域面积最大、来水最多的一级支流,流经甘肃、宁夏、陕西三省,于陕西潼关汇入黄河。以渭河流域咸阳站以上部分(以下简称渭河流域)为研究区域,地理位置位于 $33.7^{\circ}\text{N} \sim 36.2^{\circ}\text{N}$, $104.0^{\circ}\text{E} \sim 108.7^{\circ}\text{E}$ 。区域海拔在 $379 \sim 3\,739\text{ m}$,地势西高东低,主要由丘陵沟壑和关中平原构成。1982—2015年多年平均降水量约为 546.5 mm ,空间分布特征由西北向东南递增,降水主要集中在汛期(6—10月);多年平均气温约为 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于地形起伏较大、土壤疏松多孔、降水年内分布不均等,以及近年来人类活动强度加剧,流域内水旱灾害交替频发、水土流失严重,属于资源型缺水地区。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究区域采用的咸阳水文站径流资料来源于黄

河流域水文年鉴,数据时间序列为1961—2015年逐日径流数据。气象数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)发布的中国区域地面气象要素驱动数据集,包括气温、空气比湿、降水量、太阳辐射、风速等气象数据,时间分辨率为 3 h ,空间分辨率为 0.1° ,时间序列为1979—2018年。NDVI数据来源于GIMMS NDVI数据集(1982—2015年)(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>),时间分辨率为 15 d ,空间分辨率为 8 km 。该数据集具有较长的时序特征和较好的数据质量,能够较好地表征下垫面植被变化情况。

2.2 研究方法

VAR是一种多元时间序列模型,采用VAR定量分析气象要素与NDVI对径流的相对贡献程度。VAR的表达式为

$$Y_t = \Phi_1 Y_{t-1} + \Phi_2 Y_{t-2} + \dots + \Phi_p Y_{t-p} + HX_t + \varepsilon_t (t=1, 2, \dots, T) \quad (1)$$

式中: X_t 为 d 维影响因子时间序列的列向量; Y_t 为 k 维径流时间序列的列向量; Y_{t-i} 为滞后的径流变量的列向量; p 为 Y 的滞后阶数,取最大滞后阶数为12个月,即1年; T 为样本数量; Φ_i 为 $k \times k$ 维待估计的系数矩阵; H 为 $k \times d$ 维待估计的系数矩阵; ε_t 为 k 维白噪声向量。

构建径流VAR模型研究思路见图1,包括平稳性检验、格兰杰因果关系检验、方差分解3个步骤。其中,格兰杰因果关系检验^[11]的基本思想是通过比较包含滞后变量的模型和不包含滞后变量的模型的拟合优度来判断变量之间的因果关系,即气象要素与NDVI的历史数据能否解释径流量的变化,其估计回归模型如下:

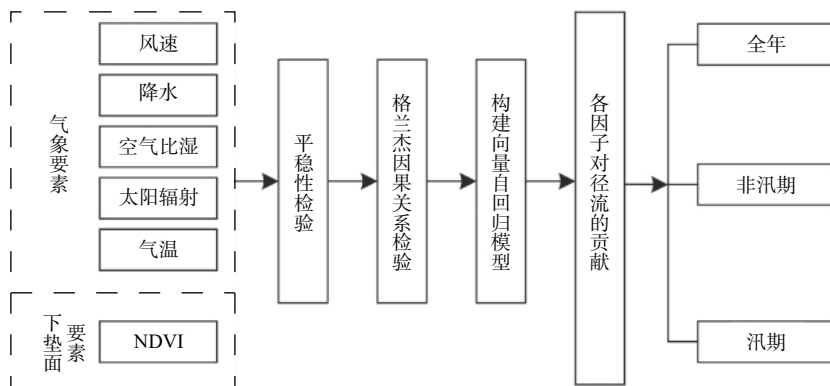


图1 基于VAR模型多尺度的径流影响因素研究思路

Fig. 1 Research idea of runoff influencing factors based on VAR model multi-scale

无约束回归模型表达式为

$$Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (2)$$

有约束回归模型表达式为

$$Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (3)$$

式中： α_0 为常数项； q 为 X 的滞后阶数。

3 结果与分析

3.1 多时间尺度径流变化特征

渭河流域 1961—2015 年多年平均径流量 37.38 亿 m^3 ，变化波动较大，历史峰值出现在 1964 年，在 1997 年最小，极值之差高达 106.40 亿 m^3 。对长序列年径流量进行线性回归，近 56 年渭河流域

年径流量线性趋势为 -0.76 mm/a ，并通过了 $\alpha=0.01$ 置信水平的显著性检验，呈显著的下降趋势，见图 2(a)。在年代尺度上，采用箱线图来分析各时期径流量的平均水平与波动程度，径流量在年代尺度上呈现多段下降—上升—下降—上升的变化过程，见图 2(b)。1970—1979 年与 1980—1989 年渭河流域径流量年代内的离散程度较大，2000—2009 年的径流分布较为集中、变化波动较小。径流量分别在 1970—1979 年与 1990—1989 年发生显著的减少态势，减少速率分别为 41%、51%，而后变化较为稳定。

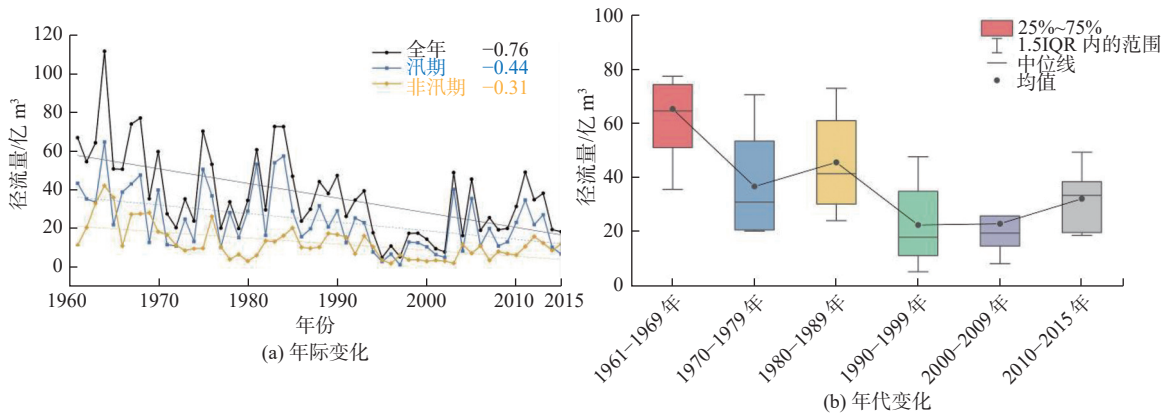


图 2 1961—2015 年渭河流域径流量年际、年代变化特征

Fig. 2 Characteristics of interannual and chronological changes of runoff in the Weihe River basin from 1961 to 2015

根据 1961—2015 年不同年代渭河流域径流量的年内变化(图 3)可以看出，渭河流域径流量峰值具有明显的年代差异，最大(1961—1969 年的 9 月)和最小(1990—1999 年的 7 月)差值达 10.5 亿 m^3 。径流量主要集中在 6—11 月，大部分年代的径流量峰值出现在 9 月，而渭河流域汛期为 6—10 月，可见径流的年内波型与汛期降水充沛密切相关。11 月至次年 5 月(非汛期)的径流量较小，变化相对较平稳。汛期是降水的集中期，其径流量是年径流量的主要组成部分(占比 65.5%)，与全年径流量“峰谷”变化趋势高度相似，说明降水是径流的主要来源。通过线性回归分析汛期和非汛期 2 个时期逐年径流的变化趋势均呈下降趋势，并都通过了 $\alpha=0.01$ 置信水平的显著性检验，变化显著，变化速率大小为全年>汛期>非汛期。

3.2 径流变化影响因素分析

以降水、气温为主的气象要素和以人类活动引起的植被变化为主的下垫面要素是导致径流量变化的重要原因，并存在具有差异的滞后效应^[12]。选取降水、太阳辐射、气温、空气比湿、风速和 NDVI

等作为影响因子。降水作为径流的主要来源是流域径流量变化的直接影响因子。气温、太阳辐射、空气湿度和风速与蒸散发的变化密切相关，植被覆盖程度会影响下垫面的截留能力^[13]，从而使土壤水分与下渗强度发生改变，对径流产生影响。为了研究渭河流域径流在汛期和非汛期的主控因子是否一致，通过构建 VAR 模型，量化其对径流的相对贡献程度，进一步探讨影响径流量变化在汛期和非汛期不同时间尺度上主控因子的差异性。

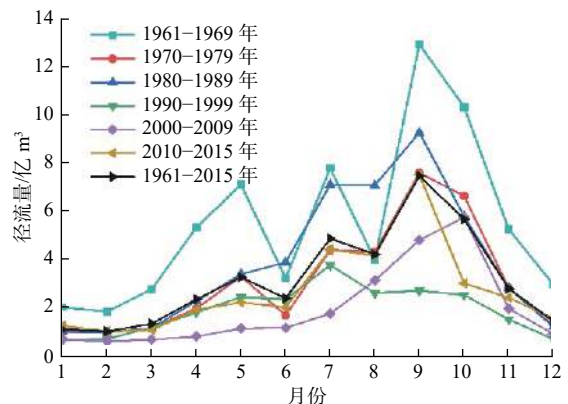


图 3 不同年代渭河流域径流量年内变化过程

Fig. 3 Intra-annual variation process of runoff in the Weihe River basin

3.2.1 向量自回归模型构建

由于 VAR 模型对于数据的平稳性要求较高,在构建 VAR 模型之前,首先需要对降水、气温、太阳辐射、相对湿度、风速和 NDVI 多个影响因子进行 ADF 平稳性检验(Prob < 0.05),验证各因子月尺度时间序列是否存在伪回归现象,移除不稳定的因子。各因子 ADF 检验值和非平稳概率见表 1,除风速以外,其他因子的时间序列均具有平稳性(Prob < 0.05),认为该时间序列格兰杰因果关系检验与贡献度分析具有合理性。由于风速没有通过构建 VAR 模型所需要的平稳性检验,结合前人研究^[14]表明风速对径流影响程度较小且相关性较低,因此风速不作为构建 VAR 模型的影响因子。

表 1 渭河流域各影响因子与径流的平稳性检验结果

Tab. 1 Smoothness test results of meteorological data, NDVI and runoff in the Weihe River basin

项目	ADF 检验值	Prob.	5%显著性水平的检验值	
NDVI	-3.569	0.034	-3.421	(C,T,12)
降水	-4.586	0	-2.869	(C,T,12)
气温	-3.579	0.032	-3.421	(C,T,12)
太阳辐射	-4.388	0.003	-3.421	(C,T,12)
空气比湿	-3.761	0.020	-3.421	(C,T,12)
风速	0.117	0.967	-2.869	(C,T,12)
径流	-3.118	0.026	-2.869	(C,T,12)

利用格兰杰因果关系检验评估所选变量之间的关联性,筛除不具有因果关系的因子,发现降水、太阳辐射、气温、空气比湿、NDVI 各影响因子均通过了显著性检验(Prob < 0.05),可作为构建 VAR 模型的输入因子。将 1982—2010 年作为 VAR 模型率定期,2011—2015 年为验证期,采用残差协方差^[15]和均方根误差^[16]对 VAR 模型进行评估,2 种指标越小表示模型的模拟越准确,其中率定期的残差协方差和均方根误差分别为 0.000 2、2.820 0,验证期分别为 0.009 0、2.860 0,表明 VAR 模型在渭河流域的适用性较好。最后通过方差分解量化不同因子的贡献程度。

3.2.2 径流影响因素贡献程度

年尺度。根据 VAR 模型中的方差分解能够量化各影响因子对径流变化过程的贡献程度(表 2),采用方差分解法对不同滞后期下各气象要素和 NDVI 对径流的影响进行分析。为考虑各影响因子对径流影响的季节性和周期性变化,初选 1 年(12 个月)作为滞后时段,由于不同因子与径流的时序关系不同,通过观察不同滞后时期下各因子对径流

贡献率的变化,判断各因子的前期影响时间,即影响因子在更多滞后期对径流的贡献率基本不变时认为该滞后期为影响因子的稳定状态下的滞后期。由表 2 和图 4 可见,除了空气比湿对径流的贡献程度在滞后 4 个月达到了稳定状态,其他因子均在滞后 10 个月左右达到稳定状态。降水对径流变化的相对贡献随时间推移由 93.44 % 下降至 50 % 左右,但仍是径流变化的主控因子。太阳辐射对径流变化的贡献率随时间推移逐渐增加至 18.45 %,太阳辐射对径流变化的影响历时较长、反馈较慢,对径流存在长期的影响。NDVI 对径流变化的贡献仅次于降水和太阳辐射,也是径流长期变化的影响因子之一。空气比湿的贡献程度(贡献率 12.5 %)首先达到稳定,可见空气比湿对径流的影响具有即时性。气温对径流变化的贡献也呈增加趋势,但贡献占比始终较小。

表 2 渭河流域各影响因子在不同滞后期下对径流变化的贡献率

Tab. 2 Contribution of each influencing factor to runoff changes in the Weihe River basin at different lags %

滞后时间/月	NDVI	降水	空气比湿	太阳辐射	气温
0	0	0	0	0	0
1	2.29	93.44	3.87	0.37	0.03
2	2.75	83.74	10.98	0.48	2.05
3	6.54	76.13	12.87	2.78	1.68
4	9.98	68.96	11.65	6.86	2.55
5	10.12	64.13	11.32	10.38	4.05
6	10.02	62.09	12.16	11.42	4.32
7	11.49	60.06	13.10	11.03	4.32
8	13.11	56.50	13.46	11.73	5.20
9	13.80	52.69	13.28	14.14	6.09
10	13.80	50.12	12.89	16.83	6.36
11	13.60	49.04	12.61	18.45	6.30

总体来看,综合考虑了平稳性检验和格兰杰因果关系的 VAR 模型计算出来的相对贡献率具有一定的可靠性。渭河流域径流变化的影响因素以降水为主、太阳辐射和 NDVI 为辅,除空气比湿外,各因子随时间变化对径流具有不同程度的滞后影响和累积效应,这与徐志鹏等^[17]发现植被与气候变化对径流影响具有累积效应的结果相类似。

汛期和非汛期。考虑到汛期和非汛期径流的变幅差异较大,多时间尺度各因子对径流的滞后作用不同,从汛期和非汛期两方面来探讨各因子对径流

变化的贡献程度,由图 5(a)可知,汛期与非汛期各因子对径流变化的影响过程存在明显差异,尤其是各因子的滞后效应与达到稳定状态的时长。非汛期各因子对径流的影响随时间变化出现显著的波动现象,NDVI 在非汛期出现了明显的滞后效应,其

次是气温。汛期只有空气比湿的滞后响应最为显著,各因子对径流的响应速度较快,相对贡献很快达到稳定状态。可见汛期与非汛期对径流产生滞后影响和累积效应的主控因子不同,而且非汛期的滞后效应表现得更为明显。

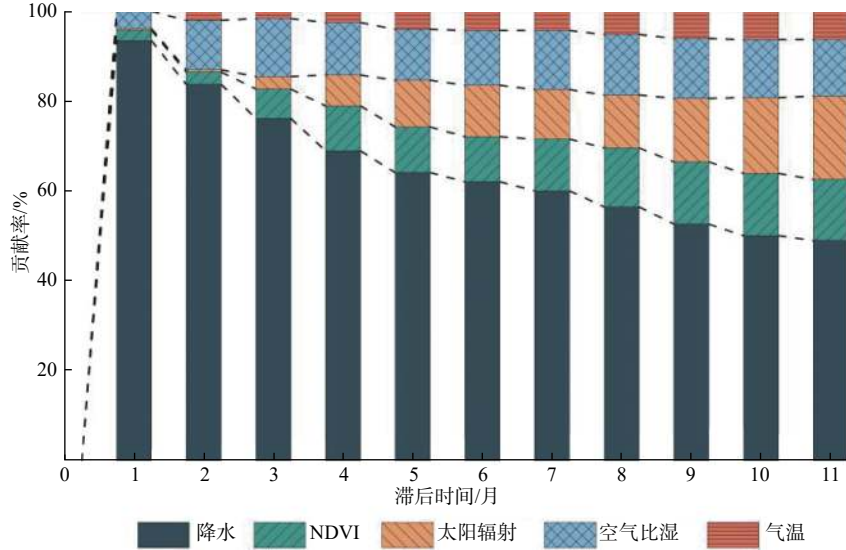


图 4 渭河流域各影响因子对径流的相对贡献率

Fig. 4 Relative contribution of influences to runoff in the Weihe River basin

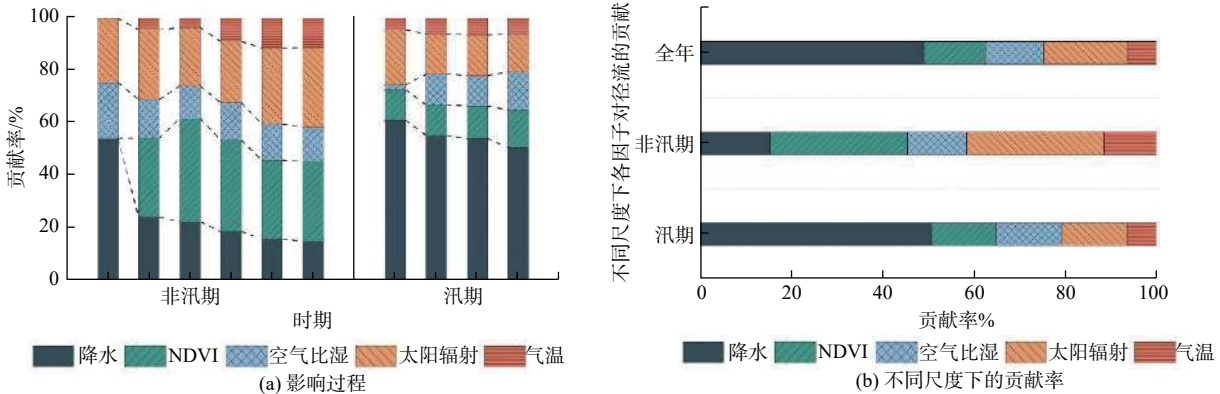


图 5 渭河流域多时间尺度各因子对径流的影响及贡献率

Fig. 5 Influence and contribution of factors to runoff at multiple time scales in the Weihe River basin

值得注意的是,汛期和全年 2 个尺度的径流贡献因子分布相似度较高[图 5(b)],降水在汛期(贡献率 50.75%)、全年(贡献率 49.04%)尺度上对径流的影响最大,是径流变化的主控因子,气温的贡献率(6.31%)最小。在年尺度上太阳辐射、NDVI 与空气比湿的贡献率分别为 18.45%、13.60%、12.61%,3 个因子在汛期的贡献程度占比相近。在非汛期影响径流变化的主控因子为 NDVI 和太阳辐射,贡献率均达 30% 以上。贡献程度从大到小依次为 NDVI > 太阳辐射 > 降水 > 空气比湿 > 气温。对比全年和汛期各因子的贡献程度,发现非汛期降水的贡献程度大幅度减弱,NDVI 对径流的影响明显

增加,气温的贡献作用在一定程度上增强。

4 讨论

渭河流域作为西部地区与关中地区人口众多、经济发展集中的重要区域,近几十年来,开展了一系列的水利工程与水土保持措施等人类活动,对植被覆盖与土地利用结构产生了影响,从而间接地影响了径流过程,并且在气候变化的双重作用下,渭河流域多年径流呈下降趋势。植被对径流的影响在开展的研究^[18]中已有详细讨论,植被变化是径流变化的主要驱动因素,不同月份的植被与径流之间呈正相关或负相关的状态,从年尺度上来看,

植被对径流的影响正负相关共存, NDVI 对径流的贡献可能存在相互抵消的现象, 并且植被与气象要素之间具有一定的互馈作用^[19-20]。植被覆盖度对径流具有调节作用和累积效应, 通过冠层截留和根系吸水的方式有效地减少地表径流, 对流域持水能力的影响与降水量、干湿气候分区^[21]等有关, 渭河流域处于具有一定持水能力的半湿润地区, 植被对水分的利用更加充分, 进一步提高了流域的保水能力。而非汛期降水量相对较小, 其影响程度大幅度降低, 植被引起的蒸散发增加^[22], NDVI 对径流的累积效应突显。NDVI 是非汛期时段影响径流变化的主控因子, 这与常玉儒等^[23]、任思羿^[24] 研究结果一致。

因此, NDVI 对径流的影响还有待进一步探究。采用 GIMMS NDVI 数据分析 1982—2015 年渭河流域 NDVI 变化, 全年、汛期和非汛期 3 种时间尺度上均呈显著的增加趋势, 见图 6。1999 年以后, 随着退耕还林还草政策的实施, 植被处于快速恢复期, NDVI 年增长速率为 $2.38 \times 10^{-3} a^{-1}$, 并通过了 $\alpha=0.01$ 置信水平的显著性检验。NDVI 的增长在汛期表现得更加显著, 变化速率达 $4.12 \times 10^{-3} a^{-1}$, 非汛期增加趋势则相对平稳为 $1.49 \times 10^{-3} a^{-1}$ 。选取 1985 年、1995 年、2005 年和 2015 年 4 个典型年份, 计算出年均 NDVI 的空间变化(图 7), 1985—1995 年渭河流域 NDVI 随时间增加 NDVI 变化尚不明显, 彼时“三北”防护林体系建设初始, 防治水土流失的方法主要是水利工程的建设而不是植被生态恢复^[25]。1999 年退耕还林还草政策实施后, 植被得以大范围恢复

和重建, 全流域 NDVI 都有不同幅度的上升, 尤其高植被覆盖度面积大幅增加, 2015 年大部分地区 NDVI 均在 0.3 以上。

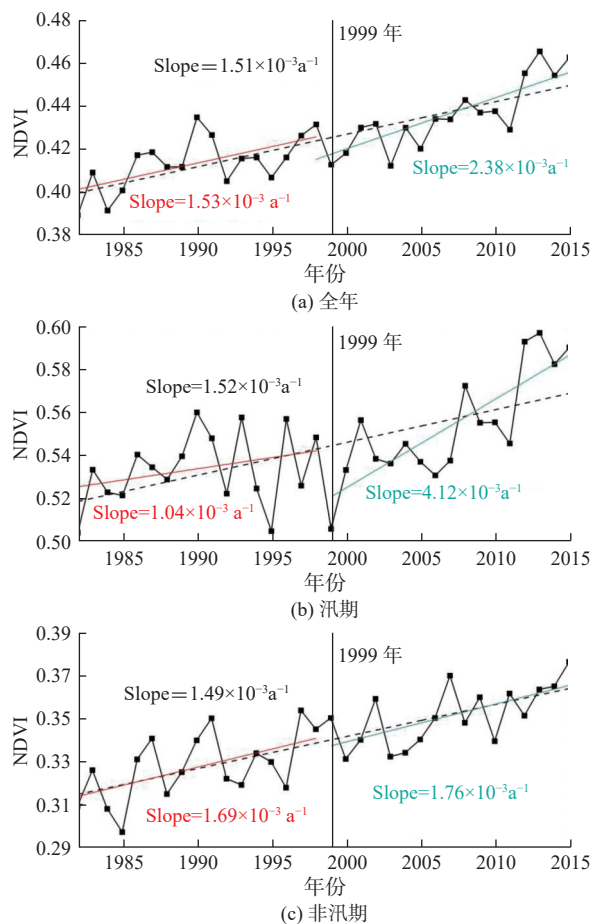


图 6 渭河流域 1982—2015 年 NDVI 时间变化特征
Fig. 6 Characteristics of temporal changes of NDVI in the Weihe River basin from 1982 to 2015

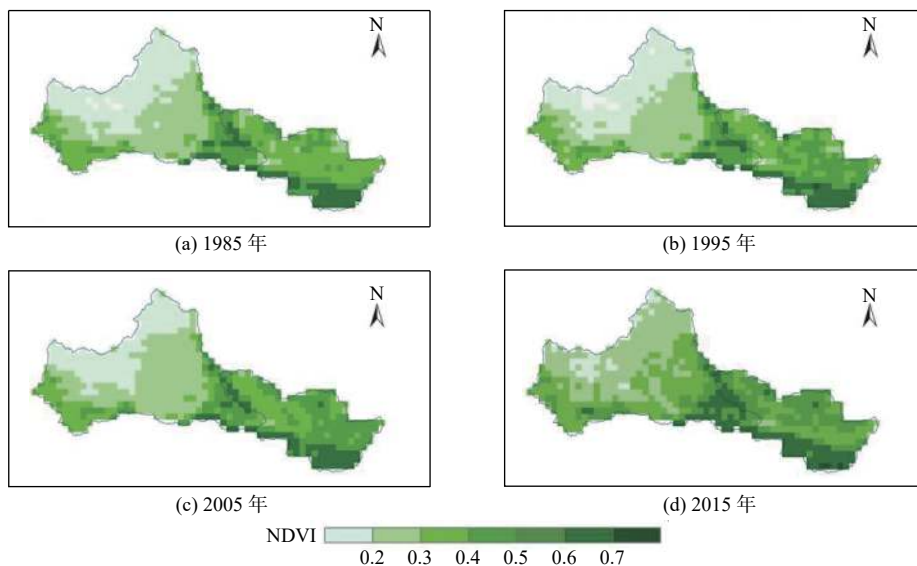


图 7 渭河流域不同年份 NDVI 空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of NDVI in different years in the Weihe River basin

关于渭河流域径流变化的归因分析已有不少学者开展过研究: 张丽梅等^[26] 利用 Budyko 水热耦合

平衡理论的水量平衡法定量评价气候变化和人类活动对径流变化的贡献率; 陈鑫等^[27] 基于 SWAT 模

型构建了径流变化归因分析模型,对比了不同驱动因素下流域径流变化的差异特征。他们的研究大多是从气候变化和人类活动两个角度来区分其影响径流的贡献程度,且研究结果也不尽相同。本文提出的研究方法,是将气候变化和人类活动两个要素进一步细分,从降水、太阳辐射、气温、空气比湿、风速、NDVI 多个因子来考虑对径流变化的影响。在全年、汛期、非汛期尺度上温度对径流变化的贡献率均最小,而太阳辐射成为对径流影响较大的因素,在非汛期的贡献率与 NDVI 相近,达 30% 左右。太阳辐射会直接作用于参考蒸散发、实际蒸散发、潜在蒸散发、植物蒸腾等来参与径流的物理过程^[28-29],张艳林等^[30]研究表明太阳辐射对径流变化的影响存在季节性差异。本文基于 VAR 模型研究发现,相对汛期,非汛期太阳辐射对径流变化的影响更大,在汛期对径流的贡献率为 14%,而在非汛期的贡献率达到 30% 以上,与研究结果相似。

对渭河流域多尺度径流影响因素进行研究时,选取了 NDVI 表征下垫面要素,除了植被覆盖度以外没有涉及其他下垫面条件,如水库建设、工农业取水用水、土地利用变化等人类活动对径流的影响,具有一定的局限性,今后的研究将考虑下垫面的复杂性,进一步完善下垫面变化对流域径流量的影响。

5 结论

基于 1961—2015 年渭河流域实测径流数据从年代、年、年内、汛期、非汛期多个时间尺度来分析渭河流域径流的变化特征,在气候变化和人类活动的共同影响下,渭河流域径流发生了显著的变化。进一步构建 VAR 模型,探讨各影响因素对渭河流域径流变化的贡献程度,发现不同尺度上径流的主控因子存在明显差异。主要结论如下:

1961—2015 年渭河流域全年、汛期、非汛期的径流整体呈下降趋势,下降速率分别为 0.76、0.44、0.31 mm/(10 a)。汛期径流量占比为 65.5%,与全年径流变化趋势高度相似。在年代尺度上,1970—1979 年与 1990—1999 年发生显著的减少趋势,不同年代间径流的离散程度存在差异,2000—2009 年径流量分布较为集中。

基于 VAR 模型中方差分解方法分析年尺度上不同滞后时间各气象因子和 NDVI 对径流的影响过程,在年尺度上,随时间变化各影响因子与径流均达到稳定状态时,径流变化的影响因素以降水为主、

太阳辐射和 NDVI 为辅,对径流具有不同程度的滞后影响。

汛期影响径流变化的主控因子为降水,贡献程度依次为降水>空气比湿>太阳辐射>NDVI>气温。非汛期的主控因子为 NDVI 和太阳辐射,降水的贡献程度大幅度减弱,各影响因素的滞后效应表现得更为明显。

参考文献:

- [1] 黄霄翔,李润杰,甘永德,等.基于Budyko假设的布哈河流域径流变化归因分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(3):480-490. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0048.
- [2] GAN G, LIU Y, SUN G. Understanding interactions among climate, water, and vegetation with the Budyko framework[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 212: 103451-103463. DOI:10.1016/j.earscirev.2020.103451.
- [3] 刘纯.基于多方法的变化环境下渭河水文气象要素变异诊断[D].邯郸:河北工程大学,2021. DOI: 10.27104/d.cnki.ghbjy.2021.000573.
- [4] 庞家泰,段金亮,张瑞,等.2000—2019年渭河流域植被覆盖度时空演变特征及气候响应[J].水土保持研究,2021,28(5):230-237. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.026.
- [5] LI H, SHI C, ZHANG Y, et al. Using the Budyko hypothesis for detecting and attributing changes in runoff to climate and vegetation change in the soft sandstone area of the middle Yellow River basin, China[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 703: 135588-135599. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135588.
- [6] 刘引鸽,龙颜,郑润禾,等.渭河流域上游气候变化及其对径流的影响[J].水资源与水工程学报,2020,31(6):1-8. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.06.01.
- [7] 刘蕊蕊.气候变化和人类活动对渭河流域径流量的影响[J].西北水电,2019(3):7-11. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2019.03.002.
- [8] 李艺珍,毛建刚,张明,等.基于VAR模型的新疆金沟河气象要素与径流关系分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(5):80-86. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.12.
- [9] 赵娟,穆兴民,高鹏,等.基于VAR模型分析径流对降水和水土保持措施的响应[J].泥沙研究,2017,42(4):37-44. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2017.

- 04.006.
- [10] 李欢玮, 赵广举, 穆兴民, 等. 渭河水文情势变化评估及归因分析[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 91-96, 105. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.20220620.010](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.20220620.010).
- [11] PAPAGIANNPOULOU C, MIRALLES D G, DECUBBER S, et al. A non-linear Granger-causality framework to investigate climate-vegetation dynamics[J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1945-1960. DOI: [10.5194/gmd-10-1945-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-1945-2017).
- [12] 毛亚花, 赵传燕, 王方圆, 等. 黑河上游天涝池流域生长季河川径流变化及主控因子分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(4): 520-524, 532. DOI: [10.13885/j.issn.0455-2059.2019.04.015](https://doi.org/10.13885/j.issn.0455-2059.2019.04.015).
- [13] ZHANG Y, CHIEW F H S, LI M, et al. Predicting runoff signatures using regression and hydrological modeling approaches[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10): 7859-7878. DOI: [10.1029/2018WR023325](https://doi.org/10.1029/2018WR023325).
- [14] EKWUEME B N, AGUNWAMBA J C. Modeling the influence of meteorological variables on runoff in a tropical watershed[J]. *Civil Engineering Journal*, 2020, 6(12): 2344-2351. DOI: [10.28991/cej-2020-03091621](https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091621).
- [15] 陈少雄. 基于残差协方差的配网多个不良量测辨识与仿真[J]. *电工材料*, 2022(3): 18-21. DOI: [10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2022.03.005](https://doi.org/10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2022.03.005).
- [16] 徐冬梅, 廖安栋, 王文川. 基于VMD-EEMD-CNN-LSTM混合模型的月径流预测[J]. *水利规划与设计*, 2023(7): 57-63. DOI: [10.3969/j.issn.1672-2469.2023.07.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2469.2023.07.015).
- [17] 徐志鹏, 刘文飞, 沈芳芳, 等. 基于扩展的Budyko模型定量评估平江流域森林恢复和气候变异对季节性径流的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8783-8793. DOI: [10.5846/stxb202002290372](https://doi.org/10.5846/stxb202002290372).
- [18] 董喆, 贺康宁, 王根柱, 等. 北川河流域降水与NDVI变化特征及其对径流的影响[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 287-295. DOI: [10.13866/j.azr.2018.02.05](https://doi.org/10.13866/j.azr.2018.02.05).
- [19] LI Q, WEI X, ZHANG M, et al. The cumulative effects of forest disturbance and climate variability on streamflow components in a large forest-dominated watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 448-459. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2017.12.056](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.056).
- [20] WEI X, ZHANG M. Quantifying streamflow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: A single watershed study[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): W12525-W12539. DOI: [10.1029/2010WR009250](https://doi.org/10.1029/2010WR009250).
- [21] GUOYI Z, XIAOHUA W, XIUZHI C, et al. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 5918-5926. DOI: [10.1038/ncomms6918](https://doi.org/10.1038/ncomms6918).
- [22] BAI M, MO X, LIU S, et al. Contributions of climate change and vegetation greening to evapotranspiration trend in a typical hilly-gully basin on the Loess Plateau, China[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 657: 325-339. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.11.360](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.360).
- [23] 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 等. 滹沱河山区径流多尺度变化规律及影响因素研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(2): 59-70. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2023.02.08](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2023.02.08).
- [24] 任思羿. 中国典型气候带植被变化与气候变异对径流影响的比较研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [25] 汪习军. 对黄土高原水土流失治理的几点认识[J]. *中国水土保持*, 1999(12): 19-21, 48. DOI: [10.14123/j.cnki-swcc.1999.12.007](https://doi.org/10.14123/j.cnki-swcc.1999.12.007).
- [26] 张丽梅, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于Budyko假设的渭河径流变化归因识别[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7607-7617. DOI: [10.5846/stxb201710121828](https://doi.org/10.5846/stxb201710121828).
- [27] 陈鑫, 刘艳丽, 刁艳芳, 等. 基于SWAT模型对气候变化与人类活动影响下径流变化的量化分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 9-18. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0079](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0079).
- [28] 谢琰, 文军, 刘蓉, 等. 太阳辐射和水汽压差对黄河源区高寒湿地潜热通量的影响研究[J]. *高原气象*, 2018, 37(3): 614-625. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00063](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00063).
- [29] YETEMEN O, ISTANBULLUOGLU E, FLORES-CERVANTES J H, et al. Ecohydrologic role of solar radiation on landscape evolution[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(2): 1127-1157. DOI: [10.1002/2014WR016169](https://doi.org/10.1002/2014WR016169).
- [30] 张艳林, 程国栋, 李新, 等. 山区太阳辐射对水热过程影响的敏感性分析[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 650-659. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0240.2012.0081](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2012.0081).

Multi-time scale characteristics and dominant control factors of runoff in the Weihe River basin

ZHAO Wenjie^{1,2}, JU Qin^{1,2}, CAI Huiyi³, TANG Zhiyang^{1,2}, SHI Qishu^{1,2}, WANG Rouxi^{1,2}, LI Sirui^{1,2}

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Nanjing 210098, China; 3. Fuzhou Planning & Design Research Institute Group Co., Ltd, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Runoff is an important part of the hydrological cycle and can respond to environmental changes. The Weihe River is the first-class tributary of the Yellow River basin and is also the most important water resource supply area, agricultural irrigation, and industrial water use in Guanzhong. Due to natural reasons such as large topographic relief, loose and porous soil, uneven distribution of precipitation within the year, and the intensification of human activities, the basin is characterized by frequent alternating water and drought disasters, serious soil erosion, and is a resource-type water-scarce area. In recent years, with climate change and the intensification of human activities, the ecological environment of the Weihe River basin has become more fragile, and the hydrological situation has also changed to different degrees. Therefore, analyzing the change characteristics of runoff in the Weihe River basin on multiple time scales and its influencing factors can help to understand the change rules of the hydrological situation of the basin and water resources planning and management.

Based on the measured runoff data from 1961 to 2015 at Xianyang Hydrological Station in the Weihe River basin, a linear regression method was used to analyze the trend of runoff on different time scales. Several meteorological factors such as temperature, specific humidity, precipitation, solar radiation, wind speed, and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were selected. The factors were screened by the smoothness test and Granger causality test. Vector Autoregression models are constructed to quantify the contribution of each influential factor to the runoff changes, and the differences of the main controlling factors of the runoff changes throughout the year, flood season, and non-flood season are explored.

The runoff showed a decreasing trend, with decreasing rates of 0.76, 0.44, and 0.31 mm/ (10 a) respectively during the whole year, flood season and non-flood season from 1961 to 2015 in the Weihe River basin. Flood season runoff accounted for 65.5 % of the total runoff, which was highly similar to the trend of the whole-year runoff. On the time scale, the runoff decreased significantly in the 1970s and 1990s. There were differences in the degree of runoff dispersion in different eras, with greater intra-annual dispersion of runoff in the 1970s and 1980s, and a more concentrated distribution of runoff from 2000 to 2009. The variance decomposition based on the vector autoregression model is used to analyze the effects of different lag times of meteorological elements and NDVI on runoff. On the annual scale, the influences of runoff changes were dominated by precipitation and supplemented by solar radiation and NDVI when the influences of the elements and runoff reached a steady state over time, with a contribution of 49.04 % for precipitation and 18.45 % and 13.60 % for solar radiation and NDVI respectively. The contribution rate of precipitation to runoff is 49.04 %, and the contribution rates of solar radiation and NDVI are 18.45 % and 13.60 % respectively, and the influence of each factor on runoff has different degrees of lag. The distribution of contributing factors to the runoff changes in the flood season and the annual scale were similar. During the flood season, precipitation was the main controlling factor for runoff changes, and the contribution of each factor was in the following order: precipitation > specific humidity > solar radiation > NDVI > temperature. During the non-flood season, the main controlling factors were NDVI and solar radiation, with a contribution of more than 30 %. The contribution of precipitation decreases significantly, the influence of NDVI on runoff increases significantly, the contribution of temperature increases to some extent, and the lag effect of the influencing factors becomes more obvious.

During the flood season and the non-flood season, the main controlling factors affecting the runoff changes are different in the Weihe River basin. During the flood season, runoff changes are mainly influenced by precipitation, while the influence of precipitation is significantly reduced during the non-flood season, and the main controlling factors affecting runoff become NDVI and solar radiation.

Key words: runoff; vector autoregressive model; NDVI; dominant control factor; Weihe River basin