

基于支持向量机的葫芦河流域径流变化的 多因素贡献率分析

白岗岗¹, 侯精明¹, 史玉品², 韩浩¹, 郭凯华¹, 李丙尧¹, 付德宇³

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2.黄河水利委员会水文局, 郑州 450004; 3.宁夏首创海绵城市建设发展有限公司, 陕西 固原 756000)

摘 要:为了定量研究气候变化及人类活动对流域径流量变化的影响,以渭河上游葫芦河流域为研究区域,利用 1965—2015 年降水和径流资料,采用累积距平法、双累积曲线法、支持向量机回归方法,定量分析了降水和人类活动对葫芦河流域径流量的贡献率。结果表明:与传统回归方法进行比较,支持向量机回归模型的判定系数较好,故采用向量机回归模型建立了回归方程。分析了在不考虑蒸散发的影响条件下,以 1965—1971 年为基准期,研究期 1972—1985 年、1986—1991 年、1992—2015 年内人类活动对径流的贡献率分别为 80.44%, 76.12%, 86.98%。最后建立了流域水土保持措施和径流的关系,揭示了退耕还林工程措施是影响该流域径流减少的主要人类活动方式。通过本研究可为该流域水资源合理开发提供参考依据,也为未来时期水土保持工程提供优化方案。

关键词:葫芦河流域; 支持向量机; 径流; 人类活动; 贡献率

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0112-06

Analysis of the Contribution Rates of Factors to Runoff in Hulu River Based on Support Vector Machine Regression

BAI Ganggang¹, HOU Jingming¹, SHI Yupin²,

HAN Hao¹, GUO Kaihua¹, LI Bingyao¹, FU Deyu³

(1.State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2.Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004,

China; 3.Ningxia Capital Sponge City Construction & Development Co., Ltd., Guyuan, Ningxia 756000, China)

Abstract: In order to quantitatively study the effects of climate change and human activities on runoff changes in a watershed, the Hulu River Basin is selected as study area. The impacts of precipitation and human activities on the decreasing trend of runoff has been quantitatively analyzed by using accumulative anomaly, the double-accumulation curve method and support vector machine (SVM) regression methods based on the data from 1965 to 2015. The results show that SVM regression model is better than general linear regression model by comparing the coefficients of determination, thus this method is used to establish regression equation; without regard to the effect of evapotranspiration, the contributions of human activities were 80.44%, 76.12% and 86.98%, respectively, at the study periods of 1972—1985, 1986—1991 and 1992—2015 on the reference period of 1965—1971; the relationship between soil and water conservation measures and runoff in the watershed is established, and the project of returning farmland to forestland is identified as the main mode of human activity affecting runoff in this basin. This research can provide the guidance for the development of water resources in the basin and an optimization plan for soil and water conservation projects in the future.

Keywords: Hulu River Basin; support vector machine; runoff; human activities; contribution rate

收稿日期:2019-03-04

修回日期:2019-05-22

资助项目:国家重点研发计划项目“多尺度水文水资源预报预测预警关键技术及应用研究”(2016YFC0402704);国家自然科学基金(51609199);2017 年宁夏建设科技计划项目“海绵城市建设效果关键指标数值模拟研究”(2017-HMKT-01)

第一作者:白岗岗(1994—),男,陕西子长人,硕士研究生,研究方向为城市雨洪模拟、水土保持。E-mail:ganggang_bai@163.com

通信作者:侯精明(1982—),男,河北怀安人,教授,博士,主要从事地表水动力及其附随过程数值模型研究。E-mail:jingming.hou@xaut.edu.cn

近年来全球环境变化加剧,水资源问题日益突出^[1-2],如长江、黄河、淮河等中国七大流域实测径流量呈不断减少的趋势,尤其西北地区河流年径流量明显减少^[3],严重阻碍水文循环过程及人类可持续发展^[4-5]。葫芦河流域是渭河第一大支流,黄河中上游较大的二级支流,对当地人类生活和水资源合理开发利用有着重要的作用。国内很多学者对葫芦河流域径流开展了研究,如聂中青等^[6]研究了葫芦河流域近 50 年降水量周期性变化特征,发现流域径流呈减少变化,且受到降水量的影响。王淑红等^[7]基于 1958—2016 年葫芦河流域水文资料,从时间角度分析了流域年径流量和年降水量的趋势变化和周期性。魏国孝等^[8]采用 SWAT 模型对葫芦河流域径流变化进行模拟,讨论了不同气候因素对径流量的响应规律。以上研究仅分析了葫芦河流域的径流变化情况,表明了降水是影响径流量的因素,但是降水和人类活动对葫芦河流域径流量影响的综合量化研究较少,故对影响葫芦河流域径流量因素进行定量分析具有一定的研究意义。

关于多因素关系分析的方法一般采用传统的数理统计方法^[9-10],但机器学习方法比传统方法有着更大的优势,受到越来越多的专家学者关注。基于机器学习的支持向量机(SVM)是继神经网络提出后的一种全新算法,该方法在处理小样本数据时比其他方法更具优势,能通过复杂的核学习能力得到最佳回归模型^[11-12]。黄辉等^[13]采用 4 种模型对污水总氮进行预测,在温度、TN、总磷等 13 种变量条件下,发现支持向量机的回归方法比其他方法预测精度更高。陈琳等^[14]利用支持向量机对地下水水质进行评价分析,结果显示支持向量机模型计算速度快且评价精度高。曲嘉铭等^[15]采用传统回归模型和基于支持向量机回归模型建立多个流域特征变量与洪水的关系式,基于支持向量机回归模型的结果比传统模型计算精度更高且模型更加稳定。

综上所述,本研究以西北地区葫芦河流域为研究对象,采取累积距平法、双累积曲线法分析葫芦河流域径流序列的突变年份,并在此基础上定量计算不同时期降水变化和人类活动对流域径流减小的贡献率,进一步建立不同水土保持措施和径流量的 SVM 回归模型,该研究可为葫芦河流域水资源合理开发和有效利用提供理论依据。

1 区域概况及数据来源

1.1 研究区概况

葫芦河流域(105°3′—106°25′E,34°45′—36°12′N)属于干旱半干旱区,发源于宁夏月亮山,是渭河一条较

大支流。流域覆盖范围为甘肃天水市、庄浪县、静宁县、秦安县以及宁夏隆德县、西吉县。流域面积约 1.07 万 km²,主河道全长约 224 km,海拔范围为 1 141~2 908 m。流域多年平均降水量 440.2 mm,全年降水量最多和最少的月份分别是 7 月和 1 月。1965—2015 年期间,多年年平均径流量为 2.654 亿 m³,最大年径流量于 1968 年达到 8.480 亿 m³最少为 2009 年的 0.274 亿 m³。流域属大陆性气候,四季分明,辐射较强,年日照时数大约 2 300 h,年辐射总量为 544.284 kJ/cm²,多年平均气温 9.2℃,年平均蒸发量 1 600~2 000 mm,多年平均输沙量达 0.727 亿 t,多年实测含沙量最大为 1 210 kg/m³^[16]。

葫芦河流域地处生态环境脆弱、水土流失严重的黄土高原,自 1999 年国家开始实施退耕还林工程,葫芦河流域退耕还林规模逐年增加,并建成大量的淤地坝群等,其生态环境有明显的改善,可见水土保持工程群对该地区的径流减小有着缓解作用^[17-18]。

1.2 数据来源

文中降水数据主要来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),包括固原、西吉、会宁、崆峒、华家岭和天水 6 个气象站的年降水时间序列数据。由于会宁气象站个别年份数据缺失,为保证数据完整可靠,采用线性插值法补全数据。考虑到降水量站空间分布均匀性,增加了威戎镇雨量站的年降雨资料,采用泰森多边形法计算得到葫芦河流域面平均降水量。水文站(秦安、静宁)的年径流数据、雨量站(威戎镇)的年降水量数据和部分水土保持措施资料均来源于黄河水利委员会,而且秦安水文站是葫芦河流域下游出口的水文站,可代表该流域的年径流量变化情况。由于水土保持措施资料为甘肃段流域 2003—2012 年退耕还林和淤地坝措施数据,故甘肃段流域径流量为秦安水文站相对静宁水文站的径流增加量。研究区的水文站点和雨量站点详细信息见表 1。

表 1 葫芦河流域水文测站基本信息

序号	站名	站别	地理坐标		数据序列
			E	N	
1	静宁	水文站	105°43′	35°32′	1975—2015 年
2	秦安	水文站	105°40′	34°54′	1965—2015 年
3	崆峒	气象站	106°24′	35°20′	1965—2015 年
4	天水	气象站	105°41′	34°35′	1965—2015 年
5	会宁	气象站	105°04′	35°41′	1965—2015 年
6	固原	气象站	106°16′	36°00′	1965—2015 年
7	西吉	气象站	105°43′	35°58′	1965—2015 年
8	威戎镇	雨量站	105°46′	35°22′	1965—2015 年
9	华家岭	气象站	105°00′	35°14′	1965—2015 年

2 研究方法

文中采用的研究方法包括累积距平法对降水量、径流量的趋势变化进行分析,通过降水—径流双累积曲线法将整个研究阶段划分为基准期和研究期,最后基于机器学习的支持向量机回归分析建立降水量和径流、水保措施和径流关系,可判断出各要素之间的关系。

2.1 趋势分析法

2.1.1 累积距平法 累积距平法是常用的、直观的判断水文气象要素趋势变化、拐点年份的一种非线性统计方法^[3]。根据径流曲线趋势变化情况判断拐点,从而确定流域径流突变年份。对于序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 其在某一时间 t 的累积距平表示为:

$$\hat{X}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}), \quad t=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: \hat{X}_t 为第 t 年的累积距平值; x_i 为第 i 年气象要素值; \bar{x} 为水文因子多年平均值, 即: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

2.1.2 双累积曲线法 双累积曲线法是进行水文气象要素趋势性变化及其强度分析的一种常用方法, 也可用于水文气象要素的一致性检验、缺值插补或资料校正^[20]。通过绘制降水量的连续累积值和径流连续累积值的关系线, 根据结果分析可划分基准期和研究期的年份。

2.2 支持向量机回归方法

假设有一样本集 $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, $x_i, y_i \in R$, 其线性回归函数为^[21-22]:

$$f(x) = wx + b \quad (2)$$

实际问题中应根据不同问题选用不同的损失函数, 在此给出损失函数一般表达式为:

$$L_z[y - f(x)] = \begin{cases} 0 & |y - f(x)| \leq \epsilon \\ |y - f(x) - \epsilon| & |y - f(x)| > \epsilon \end{cases} \quad (3)$$

通过函数的最小值可得出最佳的回归函数为:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \quad (4)$$

约束条件:

$$\begin{cases} y_i - wx_i - b \leq \epsilon + \xi_i \\ wx_i + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

式中: ξ_i 和 ξ_i^* 分别为松弛变量的上限和下限; 常数 $C > 0$ 为惩罚系数。

根据拉格朗日乘子法求解(3)式得其对偶优化方程为:

$$\max \left\{ L_D = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) x_i \cdot x_j - \epsilon \sum_{i=1}^N (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^N y_i (\alpha_i + \alpha_i^*) \right\} \quad (6)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i, \quad \alpha_i^* \leq C \end{cases} \quad (7)$$

则回归函数为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) x_i \cdot x + b \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 流域降水量及径流量年际变化特征

由 1965—2015 年葫芦河流域年降水量年际变化图(图 1A)可知, 葫芦河流域年降水量在整体上呈减少变化趋势, 但趋势不显著。51 a 以来流域多年平均降水量为 441.01 mm, 其中最大年降水量为 719.10 mm(1967 年), 最小年降水量为 285.54 mm(1997 年)。1965—2015 年期间, 年降水量小于 300 mm 的年份有 2 a, 比例为 3.92%; 年降水量大于 600 mm 年份有 4 a, 比例为 7.84%。可见, 葫芦河流域年降水量为 300~600 mm。

如图 1B 所示, 1965—2015 年葫芦河流域年径流量整体呈显著减少趋势, 且年径流量的变化幅度明显大于年降水量的变化幅度。51 a 期间流域内多年平均实测径流量为 2.65 亿 m^3 , 其中最大年径流发生在 1968 年, 年径流为 8.48 亿 m^3 , 最小年径流发生在 2009 年, 年径流仅为 0.27 亿 m^3 , 径流量的极值比达 31 倍。1990—2012 年期间的年均径流量仅为 1.28 亿 m^3 , 不超过多年平均值的 50%, 而 1965—1974 年期间的年径流为 5.37 亿 m^3 , 超过多年平均值的 50%。由此发现 90 年代以来, 该流域径流减少幅度明显。

3.2 流域径流量突变特征分析

3.2.1 基于累积距平法的径流量突变年份分析 采用累积距平法分析了葫芦河流域年径流量时间序列的突变点(图 2)。由累积距平结果知, 1965—1971 年年径流量维持在一个较高水平, 1972—1985 年的年径流量较前一段有所减少, 但仍高于多年平均值, 表现为年距平累积继续呈增加趋势。在 1971 年前后发生了第 1 次较明显的突变, 年径流量趋于减少; 1985 年后发生了第 2 次突变, 表现为年径流量已减少到低于均值水平以下的变化; 1991 年发生了第 3 次突变, 1991 年后年径流量在均值以下快速减少。由 1965—2015 年累积距平的结果与分析, 径流量发生突变年份为 1971 年、1985 年和 1991 年, 可划分为 4 个阶段: 1965—1971 年、1972—1985 年、1986—1991 年及 1992—2015 年。

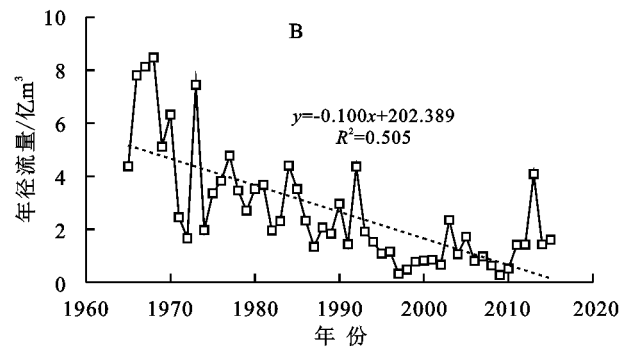
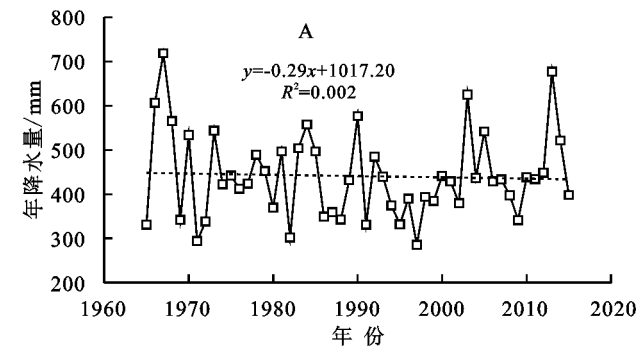


图1 1965—2015年葫芦河流域降水量和径流量的年际变化

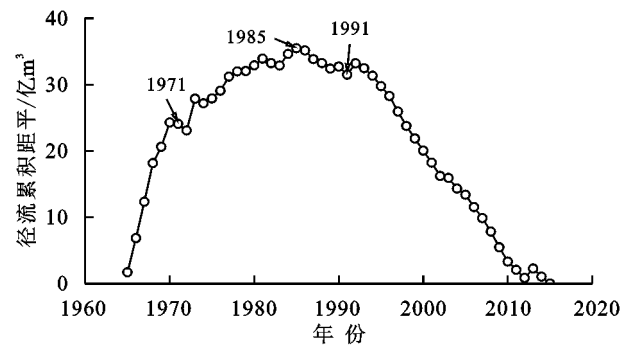


图2 葫芦河流域径流量累积距平

3.2.2 基于降水量和径流量双累积曲线的径流量突变分析 赵广举等^[23]对华县、花园口等6个水文站点采用径流—降水累积曲线,判断出各个站点的径流突变点。侯钦磊等^[24]采用降水—径流双累积曲线法分别判断出林家村站、咸阳站和华县站3个水文站点的径流突变点以及划分其基准期和研究期。张艳霞等^[25]研究锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应,采用径流—降水累积曲线识别锡林河流域径流突变点为1984年、2000年,进而可划分为1968—1984年、1985—2000年和2001—2015年。故在累积距平法判断出葫芦河流域径流量突变年份的基础上,采用降水量和径流量双累积曲线识别径流量时间序列的拐点年份,通过比较验证突变年份选取的合理性。当只有降水变化时,双累积曲线呈一条直线;当受到人类活动等因子影响时,曲线会出现拐点,且偏移程度越大,说明人类活动等影响越大,据此可判断出开始受人类活动影响的时间和人类活动影响程度^[23]。由降水累积量和径流累积量双曲线图(图3),在降水和人类活动的共同作用下,双累积曲线的斜率在1971年、1985年、1991年发生显著变化。分析双累积曲线不同阶段趋势变化可知,曲线在1971年发生了第1次偏移,第2次和第3次偏移分别发生在1985年和1991年。一般将降水量和径流量双累积曲线开始发生显著偏移前的一段时期作为基准期,该时期内的年径流量未受人类活动的严重干

扰,可看作为近似天然径流阶段^[24-25]。因此,结合累积距平和双累积曲线的结果,将葫芦河流域径流量序列划分为4个年段,1965—1971年作为葫芦河流域的基准期,1972—1985年、1986—1991年、1992—2015年分别作为研究Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ期。

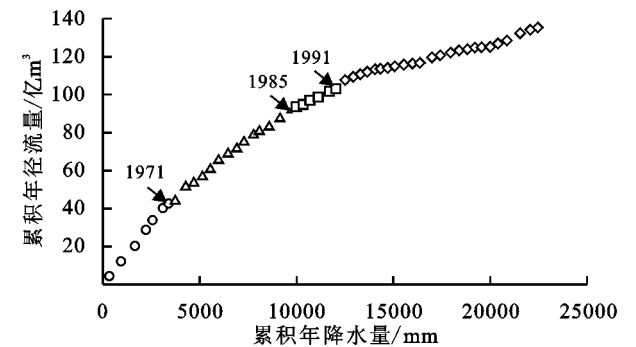


图3 葫芦河流域累积降水量和累积径流量的关系

进一步分析基准期累积径流量和累积降水量的一般线性回归模型和基于机器学习的支持向量机回归模型。由表2中两种模型计算的判定系数 R^2 结果比较,支持向量机回归模型较一般线性回归模型拟合较好,故下节选用此方法计算降水和人类活动对葫芦河径流的贡献率大小。

表2 传统回归模型和支持向量机回归模型比较

方法	公式	R^2
传统方法	$\sum R = 0.05 + 0.0128 \sum P$	0.996
SVM方法	$\sum R = 0.03 + 0.0130 \sum P$	0.997

3.3 影响径流量的驱动因子分析与贡献率计算

基于前节模型的比选,根据基准期1965—1971年内降水量和径流量的年系列资料,由公式(8)计算,建立方程如下:

$$R = 1.25 + 0.0097P, \quad r^2 = 0.7839 \quad (9)$$

式中: R 为年平均径流量(亿 m^3); P 为年平均降水量(mm)。

公式(9)反映了降水量和径流量的关系变化,在1965—1971年期间,随着降水量的增加,径流量呈现

增加变化。根据上述方程和已知降水数据便可算出各时段自然状态下的径流量。而基准期的实测径流量与其差值便为该时段降水变化对其径流变化的影

响值,各时段径流实测值与基准期径流实测值的差值即为总减少量,而人类活动影响量便是总减少量减去降水变化的影响值^[26-27](表 3)。

表 3 降水和人类活动对葫芦河径流影响计算结果

研究期	降雨/mm	径流			降水因子		人类活动因子	
		实测值/亿 m ³	计算值/亿 m ³	总减少量/亿 m ³	影响量/亿 m ³	影响率/%	影响量/亿 m ³	影响率/%
1965—1971 年	484.65	6.095						
1972—1985 年(Ⅰ期)	446.50	3.467	5.581	2.628	0.514	19.56	2.114	80.44
1986—1991 年(Ⅱ期)	398.43	1.991	5.115	4.104	0.980	23.88	3.124	76.12
1992—2015 年(Ⅲ期)	435.71	1.342	5.476	4.753	0.619	13.02	4.134	86.98
1972—2015 年	428.26	2.107	5.404	3.988	0.691	17.32	3.297	82.68

注:降雨为时段平均值。

3.4 水保工程措施对径流量的影响分析

20 世纪以来,葫芦河流域开展了大量的水保工程措施,为有效治理黄土高原区自然环境脆弱和水土流失严重等问题。这些水保工程措施作为该流域主要的人类活动,其中退耕还林和淤地坝工程措施对黄土高原区的径流量影响较大,且退耕还林工程的水土保持效果更加显著^[28-29]。基于该流域(甘肃段)2003—2012 年水保措施和径流量(甘肃段流域)资料,进一步探讨不同的人类活动对葫芦河流域径流量的影响重要程度。基于机器学习的 SVM 回归模型建立不同水保工程措施与径流量的关系式,如下:

$$Y = -0.0038X_1 - 0.0019X_2 + 5.1089 \quad (10)$$

式中:Y 为年平均径流量(亿 m³);X₁ 为退耕还林总面积(km²);X₂ 为已修建淤地坝的控制面积(km²)。

由上式系数分析可知,退耕还林和淤地坝措施与径流量呈负相关,即退耕还林和淤地坝的规模逐年增大,葫芦河流域的径流量逐年减少。由于这些水保工程措施实施,故将部分径流留在了当地,与实际情况一致。退耕还林工程的系数权重大于淤地坝措施的系数权重,揭示了退耕还林工程是影响该流域径流量的主要人类活动方式。根据黄河水利委员会统计的水保资料,该流域(甘肃段)2003—2012 年每年退耕还林总面积都远大于淤地坝工程总控制面积,约为淤地坝工程总控制面积的 6~8 倍。由于淤地坝常年泥沙沉积,使有效控制面积不断减小,从而影响其水土保持效益,而退耕还林工程的水土保持功能具有一定的持续性,则退耕还林工程是减少水土流失的主力军^[29]。故深入研究葫芦河流域不同水保措施对径流量的影响,对探究水土保持效益和制定水土保持规划有着重要意义^[30]。

4 结论

(1) 分别建立基准期累积径流量和累积降水量

的一般线性回归模型和支持向量机回归模型,比较判定系数 R² 可得,传统线性回归模型 R² 为 0.996,支持向量机回归模型 R² 为 0.997,故支持向量机回归模型比传统线性回归模型拟合较好。

(2) 采用累积距平法和双累积曲线法对径流量进行突变分析,得到流域径流量的突变年份为 1971 年、1985 年和 1991 年。人类活动在 1972—1985 年、1986—1991 年、1992—2015 年 3 个期段对径流的贡献率分别为 80.44%,76.12%,86.98%;对于整个研究期,人类活动与降水量分别对径流的贡献率为 82.68%,17.32%。由此可得,人类活动是葫芦河流域年径流改变的主要影响因素。

(3) 基于支持向量机回归模型建立退耕还林措施、淤地坝措施与径流量的关系式,得到退耕还林措施系数权重为-0.003 8,淤地坝措施系数权重为-0.001 9,揭示了退耕还林措施和淤地坝措施与径流量呈负相关关系,且退耕还林措施对径流量的影响较淤地坝措施大。

文中仅考虑了降水作为气候变化的因素,进而分析降水对流域径流量的影响程度,没有将蒸发作为影响径流量因素,是因为年蒸发量不是葫芦河流域年径流变化的主要原因^[31]。此研究结果可为葫芦河流域的水资源规划和管理,水保工程措施规划方案的优化设计提供参考依据。

参考文献:

[1] 王彦君,王随继,苏腾.降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J].自然资源学报,2015,30(2):304-314.
[2] 郭爱军,畅建霞,黄强,等.渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(8):212-220.
[3] 王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].地理学报,2012,67(3):388-397.

- [4] 张建云,章四龙,王金星,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234.
- [5] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.
- [6] 聂中青,贾冰,丁贞玉,等.近 50 a 葫芦河流域气候变化特征[J].兰州大学学报:自然科学版,2009,45(2):7-11,19.
- [7] 王淑红,张钰,王大超,等.1956—2016 年渭河支流葫芦河流域径流及降水的年际变化特征[J].冰川冻土,2018,40(2):370-377.
- [8] 魏国孝,杨佳丽,徐涛,等.甘肃葫芦河流域径流变化的 SWAT 模型模拟[J].兰州大学学报:自然科学版,2009,45(6):1-7.
- [9] 孙悦,李栋梁.1975—2011 年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应[J].冰川冻土,2014,36(2):413-423.
- [10] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展,2014,25(2):155-163.
- [11] 张学工.关于统计学习理论与支持向量机[J].自动化学报,2000,26(1):36-46.
- [12] Kromer P, Musilek P, Pelikan E, et al. Support Vector Regression of multiple predictive models of downward short-wave radiation [C] // 2014 International Joint Conference on Neural Networks. New Jersey, USA: IEEE,2014.
- [13] 黄辉,马思佳,王庆,等.多参数影响下污水总氮浓度预测最优方法研究[J].南京大学学报:自然科学版,2017,53(6):1194-1202.
- [14] 陈琳,刘俊民,刘小学.支持向量机在地下水水质评价中的应用[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(11):221-226.
- [15] 曲嘉铭,徐长江,陈华,等.基于支持向量机回归的区域洪水频率分析[J].人民长江,2018,49(16):14-18,86.
- [16] 张丽. SWAT 模型参数优化与土地利用变化的径流效应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [17] 寇萌,焦菊英.黄土丘陵沟壑区抵抗土壤侵蚀的植物群落结构特征[J].水土保持研究,2018,25(6):7-14,21.
- [18] 刘泉,陈朝镇.黄土高原水土流失的现状与思考[J].绵阳师范学院学报,2007,26(2):101-105.
- [19] Zhang M F, Wei X H, Sun P S, et al. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large watershed: The case study in the Upper Minjiang River of Yangtze River basin [J]. Journal of Hydrology, 2012,464/465:1-11.
- [20] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [21] 李永娜.基于支持向量机的回归预测综述[J].信息通信,2014(11):32-33.
- [22] 杜树新,吴铁军.用于回归估计的支持向量机方法[J].系统仿真学报,2003,15(11):1580-1585,1633.
- [23] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.
- [24] 侯钦磊,白红英,任园园,等.50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J].资源科学,2011,33(8):1505-1512.
- [25] 张艳霞,于瑞宏,薛浩,等.锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应[J].干旱区研究,2019,36(1):67-76.
- [26] 邱临静,郑粉莉,尹润生,等.降水变化和人类活动对延河流域径流影响的定量评估[J].气候变化研究进展,2011,7(5):357-362.
- [27] 姚治君,管彦平,高迎春.潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J].地理科学进展,2003(6):599-606.
- [28] 王明玉,王百田.不同水土保持措施对黄土高原小流域年径流和产沙的影响:以平凉纸坊沟为例[J].林业科学,2016,52(8):10-20.
- [29] 张守红,刘苏峡,莫兴国,等.降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J].北京林业大学学报,2010,32(4):161-168.
- [30] 穆兴民,王飞,李靖,等.水土保持措施对河川径流影响的评价方法研究进展[J].水土保持通报,2004,24(3):73-78.
- [31] 王淑红.渭河支流葫芦河干流径流变化特征及其影响因素分析研究[D].兰州:兰州大学,2018.