

DOI: 10.5846/stxb202204151013

韩建纯, 李鹏, 杨志, 张祎, 许垚涛, 封扬帆, 党小虎. 基于随机森林模型的茹河流域水沙变化及其影响因素研究. 生态学报, 2023, 43(10): 4190-4201.
Han J C, Li P, Yang Z, Zhang Y, Xu Y T, Feng Y F, Dang X H. Variation and influencing factors of runoff and sediment in Ru River Basin based on random forest model. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4190-4201.

基于随机森林模型的茹河流域水沙变化及其影响因素研究

韩建纯¹, 李 鹏^{1,2,*}, 杨 志³, 张 祎⁴, 许垚涛¹, 封扬帆¹, 党小虎⁵

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 旱区生态水文与侵蚀灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 西安 710048

3 宁夏回族自治区水土保持监测总站, 银川 750002

4 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

5 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710055

摘要:水沙关系不协调已成为制约黄河高质量发展的关键问题, 揭示径流量与输沙量变化的主要影响因素, 对适应生态经济发展条件下的水土流失治理工作具有指导意义。以茹河流域为研究对象, 采用 M-K 检验和 Pettitt 检验分析茹河流域 1989—2019 年水沙变化趋势, 运用双累积曲线法定量研究了降雨和人类活动对茹河流域径流量、输沙量变化的贡献率, 通过随机森林回归分析探索了影响水沙变化的主控因子。结果表明: (1) 茹河流域径流量和输沙量峰值对应情况良好, 但在 2012 年之后径流量和输沙量呈现出明显分异, 径流量逐渐增加, 输沙量平稳减小。 (2) 茹河流域径流量突变点为 1996 年和 2003 年, 输沙量突变点为 1996 年和 2004 年, 影响期的两个阶段中, 人类活动对径流量的贡献率分别为 95.95% 和 77.52%, 对输沙量的贡献率分别为 78.31% 和 77.91%。 (3) 显著影响径流量的因子为农作物播种面积、耕地面积、草地面积和人口密度, 显著影响输沙量的因子为植被覆盖度、水利环境投资占比、人口密度和工业总产值。 (4) 农作物播种面积和耕地面积的变化对径流量的影响均呈显著正相关, 草地面积和人口密度对径流量响应关系为显著负相关; 植被覆盖度、水利环境投资占比、工业总产值等因子与输沙量呈现出显著负相关关系。人类活动对水沙变化的影响复杂多变, 仅在单因子作用情况下对径流量与输沙量的作用易受到限制, 现阶段水土流失治理需要结合经济—生态—社会等因素进行综合治理。

关键词:水沙变化; 人类活动; 随机森林回归

Variation and influencing factors of runoff and sediment in Ru River Basin based on random forest model

HAN Jianchun¹, LI Peng^{1,2,*}, YANG Zhi³, ZHANG Yi⁴, XU Yaotao¹, FENG Yangfan¹, DANG Xiaohu⁵

1 State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2 State Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China

3 Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002, China

4 School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

5 School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710055, China

Abstract: The uncoordinated relationship between runoff and sediment has become a key problem restricting the high-quality development of the Yellow River. Revealing the main influencing factors of changes in runoff and sediment transport

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42107368)

收稿日期:2022-04-15; **采用日期:**2023-02-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lipeng74@163.com

has guiding significance for soil erosion control under the conditions of ecological and economic development. This study took the Ru River Basin as the research object. The M-K test and Pettitt test were used to analyze the water and sediment change trend of the Ru River Basin from 1989 to 2019. The contribution rate of human activities to the changes of runoff and sediment transport in the Ru River Basin was quantitatively studied by using the double mass curve method. The main influencing factors of runoff and sediment transport change were explored by random forest regression analysis. The results show that: (1) the runoff and sediment transport peak corresponded well in the Ru River Basin, but the runoff and sediment transport showed obvious differences after 2012, with the runoff increasing gradually and the sediment transport decreasing steadily. (2) The sudden change of runoff in the Ru River Basin was in 1996 and 2003, and the sudden change of sediment transport was in 1996 and 2004. In the two stages of the impact period, the contribution rates of human activities to runoff were 95.95% and 77.52%, respectively, while the contribution rates to sediment transport were 78.31% and 77.91%, respectively. (3) The factors that significantly affected the runoff were crop sown area, the cultivated land area, grassland area and population density. The factors that significantly affected sediment transport were vegetation coverage, proportion of water conservancy and environmental investment, population density and total industrial output value. (4) The influence of crop sown area and cultivated land area on runoff was significantly positively correlated. There was significantly negative correlation between grassland area and population density in response to runoff. Factors such as vegetation coverage, proportion of water conservancy and environmental investment, and total industrial output value had significantly negative correlation with sediment transport. The influence of human activities on runoff and sediment transport change was complex and changeable, and the effect on runoff and sediment transport was easily limited only in the case of single factor. At present, the control of soil and water loss needs to be integrated with economic, ecological and social factors.

Key Words: change of runoff and sediment; human activities; random forest regression

近几十年来,气候变化和人类活动对生态环境的影响愈发显著,并进一步影响了水文过程,特别是对径流和泥沙的变化最为显著,引起了广泛关注^[1-4]。人类活动造成下垫面变化^[5],进而对地表径流形成、产沙机制及输沙过程产生了巨大影响^[6-7],且社会和生态系统的结构、过程和功能也随之发生变化^[8],使得流域的径流量和输沙量发生显著变化^[9]。人类活动受到政策和社会经济因素的制约^[10-12]。因此,揭示社会经济因素、生态因素与水沙变化之间的响应关系对于水土流失治理至关重要。

目前关于影响径流量、输沙量变化的研究多集中于水土保持措施、水沙变化趋势等方面,以社会经济、生态恢复等具体因子为出发点探讨对径流、输沙影响变化的研究较少^[5]。为了有效控制水土流失,恢复生态环境,政府采取了各种治理措施和政策。梯田、淤地坝等工程措施的建设以及退耕还林政策的实施,造成了泥沙供应过程和流域下垫面条件的变化,从而影响了径流、土壤侵蚀、水沙输送的连通性,并大幅减少了黄河输沙量^[13]。阐明各种措施对径流量、输沙量变化的影响对今后水土保持工作具有重要意义。Zhao 等人^[14]量化了人为因素和气候因素对径流量和输沙量变化的贡献,发现淤地坝建设在控制泥沙输移方面发挥着重要作用;刘二佳^[15]分析了黄土高原地区北洛河流域的水沙变化,表明生态恢复措施在减水减沙方面良好的治理效果;张建^[16]分析了彭阳县小河流域水沙变化的影响贡献率,发现非降雨因素对径流量和输沙量的贡献率为 84% 和 79%。人类活动受到社会经济条件的制约,社会经济因素通过影响人类活动改变径流量和输沙量,农村人口的减少、产业结构的变化均造成了下垫面的变化^[17],进而对径流量、输沙量产生了影响。少数研究^[18]通过构建指标体系,采用多元回归分析方法对水沙变化的影响进行探究,而多元回归分析限制条件较多,面对复杂的非线性问题时解释能力较差。相比之下,随机森林回归模型具有较高的预测精度,且能处理多重共线性的数据,便于计算变量的非线性作用^[19]。

本研究选择宁夏回族自治区彭阳县茹河流域为研究对象,探讨近年来人类活动产生的经济、社会和生态

等因素对径流量和输沙量的响应关系。本研究的具体目标是:(1)分析径流量、输沙量的趋势变化以及突变时期,量化降雨和人类活动对径流量和输沙量的相对贡献度;(2)揭示经济、社会、生态等人类活动因素对径流量、输沙量的影响,以期为促进流域水土流失治理可持续发展提供指导。

1 研究区概况

茹河属于黄河的二级支流,位于宁夏回族自治区东南边隅(图1),六盘山脉东侧,地处黄土丘陵沟壑区。流域总面积为2470km²,占彭阳县总面积的73%,东、南、北分别与甘肃省接壤。该流域地形复杂、地貌破碎,水土流失严重。干旱少雨是当地最主要气候特征,流域范围内多年平均年降雨量在420—550mm,自1999年实施退耕还林政策以来,生态环境得到极大改善。年平均径流量为2763万m³,年平均输沙量为519万t。流域干流上设有彭阳水文站(图1),控制面积1544km²,并设有青石嘴、任河、店子洼及党家沟等15处雨量站^[20],站网密度相对较大,水文资料较多,能够满足研究需要。

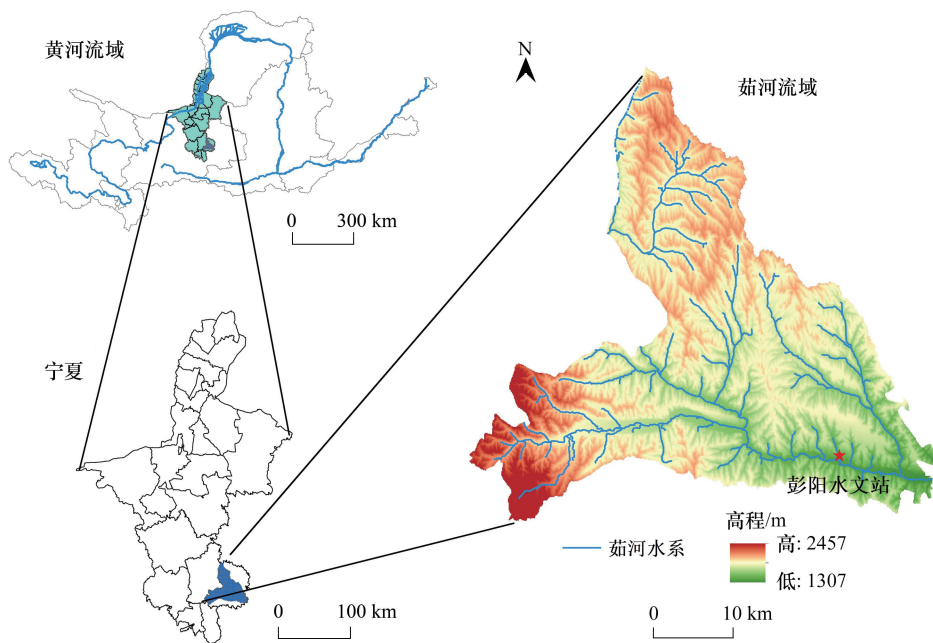


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

2 研究方法与数据来源

2.1 数据来源与预处理

本研究采取的降雨量,径流量与输沙量数据由宁夏水土保持监测中心提供,时间分辨率为日水文数据,时间跨度为1989—2019年,通过水文计算获取多年平均水文数据,茹河流域范围涉及彭阳县各乡镇,因此选取《宁夏统计年鉴》中彭阳县的统计数据来表示茹河流域的社会经济数据,来源于《宁夏统计年鉴》;淤积库容数据由水土保持监测中心提供;土地利用数据来源于Zenodo数据网站(<https://zenodo.org/record/4417810#.YShGWugzbBU>),空间分辨率为30m;NDVI数据来源于中国科学院资源与环境数据中心网站(<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=257>),空间分辨率为1000m。

2.2 研究方法

2.2.1 水沙变化趋势及突变分析

利用Mann-Kendall统计检验方法(以下简称为M-K检验)对水文气象要素进行趋势分析。检验统计量值

为正,表示气象水文序列呈增加趋势,为负值则表示数据呈现出减少趋势。当检验统计量(U)绝对值大于 1.65、1.96 和 2.58 时,分别表示序列通过了置信度为 90%、95% 和 99% 的显著性检验,检验统计量绝对值越大,趋势越显著。该方法不考虑样本序列的分布特征,且样本中少数极大、极小异常值也不会对结果造成影响,能很好的揭示时间序列的变化趋势^[21]。采用 Pettitt 突变检验法对水文要素进行突变检验,该方法将可能发生突变的时间节点把序列分为前后两个时段,认为这两个时段数据均来自同一样本。

2.2.2 气候变化与人类活动贡献率

本研究采用双累积曲线法来研究降雨和人类活动对径流量、输沙量变化的影响,以对径流量变化的影响为例^[22],双累积曲线计算贡献度的方法如下:

$$\sum Q_{\text{基}} = k \sum P_{\text{基}} + b \quad (1)$$

$$\sum Q_{\text{基计算}} = k \sum P_{\text{基}} + b \quad (2)$$

$$\sum Q_{\text{影计算}} = k \sum P_{\text{影}} + b \quad (3)$$

式中, $\sum Q_{\text{基}}$ 为基准期径流累积量, $\sum P_{\text{基}}$ 为基准期降雨累积量, k 和 b 为基准期降雨-径流双累积曲线的线性回归方程参数, $\sum Q_{\text{基计算}}$ 为基准期径流累积量的计算值, $\sum Q_{\text{影计算}}$ 为影响期径流累积量的计算值, $\sum P_{\text{影}}$ 为影响期径流累积量。

$$\overline{\Delta Q} = \sum Q_{\text{影计算}}/n - \sum Q_{\text{影实测}}/n \quad (4)$$

$$\overline{\Delta Q_{\text{计算}}} = \sum Q_{\text{影计算}}/n - \sum Q_{\text{基计算}}/m \quad (5)$$

式中, $\overline{\Delta Q}$ 为影响期年均径流量变化, $\sum Q_{\text{影计算}}/n$ 为影响期计算年均径流量, $\sum Q_{\text{影实测}}/n$ 为影响期实测年均径流量, $\sum Q_{\text{基计算}}/m$ 为基准期计算年均径流量, n 为影响期时间长度, m 为基准期时间长度。

$$\varepsilon_{\text{降雨}} = \overline{\Delta Q_{\text{计算}}} / \overline{\Delta Q} \times 100\% \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{人}} = (\overline{\Delta Q} - \overline{\Delta Q_{\text{计算}}}) / \overline{\Delta Q} \times 100\% \quad (7)$$

式中, $\varepsilon_{\text{降雨}}$ 为降雨对径流量变化的贡献率, $\varepsilon_{\text{人}}$ 为人类活动对径流量变化的贡献率。

2.2.3 水沙变化影响因子重要性评估

随机森林(Random Forest)模型是一种非参数回归机器学习算法,由 Leo Breiman 于 2001 年开发,是一种集成学习方法,用于分类、回归和其他任务。假设因变量(径流量、输沙量)有 n 个实测值,有 m 个影响因子与其相关(经济-社会-生态因素中相关因子),通过采用 Bootstrap 重抽样的方法从 n 个原数据中随机抽取 n 个观测值,选择部分变量作为分类树节点,从而构建几百甚至几千个分类树组合成随机森林,将重复程度最高的树作为最终结果。采用随机森林回归分析能够对影响因子的相对重要性进行排序,对径流量、输沙量进行预测。变量重要性是基于变量数据被置换时,预测误差增加的程度^[22],预测误差减少百分比(IncMSE)是衡量将一个变量的取值变为随机数后随机森林预测准确性降低程度的指标^[23],IncMSE 值越大,说明相应变量的重要性越大,对模型的贡献越高^[24]。本研究同样将其作为重要性排序的衡量标准。使用 RandomForest 和 ranger 软件包^[25]在 R 数据分析软件中进行随机森林回归分析,ntree 参数设置为 2000 棵树,其他参数设为默认值^[26]。

3 研究结果

3.1 降雨和人类活动对径流输沙变化影响

3.1.1 径流及输沙变化趋势

茹河流域 1989—2019 年径流量、输沙量年际变化结果显示(图 2),1989 年—2011 年间,茹河流域年径流

量、输沙量变化趋势基本一致、峰值对应情况良好,重叠度较高,最大径流量为 1996 年的 8135 万 m³,最大输沙量为 1996 年的输沙量 2969 万 t,均呈现出明显减小趋势;但在 2012 年之后径流量和输沙量结果出现明显差异,径流量明显增大,而输沙量平稳减小。采取 M-K 检验和 Pettitt 突变检验对径流量、输沙量进行分析(表 1),结果均通过显著性检验,M-K 检验结果显示径流量变化的统计量绝对值均低于输沙量,说明输沙量下降幅度更大,Pettitt 突变分析结果显示(图 3,图 4),在 1989—2019 年间,年径流量于 2003 年发生突变,年输沙量于 2004 年发生突变,而进一步对突变前后的径流量与输沙量进行 Pettitt 检验,结果显示年径流量和年输沙量于 1996 年同样存在突变点。

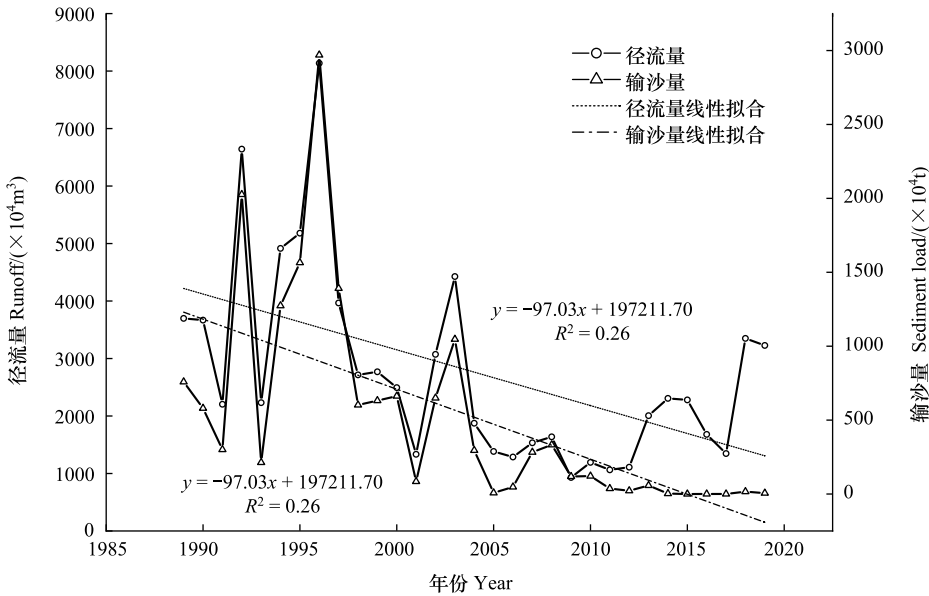


图 2 径流量、输沙量年际变化
Fig.2 Interannual variation of runoff and sediment transport

表 1 M-K 趋势分析、Pettitt 检验结果

Table1 M-K trend analysis, Pettitt test results

目标 Target	M-K 趋势分析 M-K Trend Analysis		Pettitt 突变检验 Pettitt mutation test	
	检验统计量 Test statistics	显著水平 Significant level	突变点 Discontinuity	显著性 Salience
径流量 Runoff	-2.68	0.0072	1996/2003	0.0023/0.0064
输沙量 Sediment transport	-4.86	0.0001	1996/2004	0.0001/0.0089

3.1.2 降雨和人类活动对水沙变化的贡献率分析

菇河流域降雨量-径流量双累积曲线和降雨量-输沙量双累积曲线(图 5)所示,1989—2019 年期间,径流量和输沙量均出现了两次转折点,且第一次转折点均为 1996 年,径流量第二次转折点位于 2003 年,输沙量第二次转折点为 2004 年,这与 Pettitt 检验结果一致。1996 年之前,人类活动对菇河流域水沙变化的影响较小,因此,本研究将 1989—1996 年设为基准期,来量化菇河流域降雨量和人类活动对水沙变化的贡献率。

降雨量和人类活动对菇河流域径流量、输沙量的贡献率表(表 2 和表 3)所示,近年来对菇河流域径流量和输沙量变化的主要影响因素是人类活动。人类活动影响径流量和输沙量最显著的阶段是 1997—2003 年,对减少径流量和输沙量的贡献度分别为 95.95%和 78.31%;2004—2019 年人类活动对径流量减少的贡献率为 77.52%,与 1997—2003 年相比降低了 18.43%;该阶段人类活动对输沙量减少的贡献率为 77.91%,相比于 1997—2003 年降低了 0.4%,人类活动对减水减沙效益的贡献在明显降低。

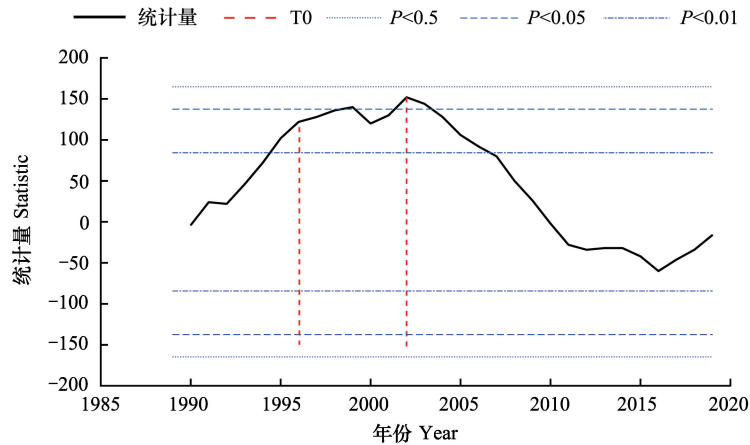


图3 茹河流域径流量变化突变点

Fig.3 Sudden change point of runoff change in the Ru River basin

UT 表示样本统计量;T0 表示突变时间;P 表示显著性水平

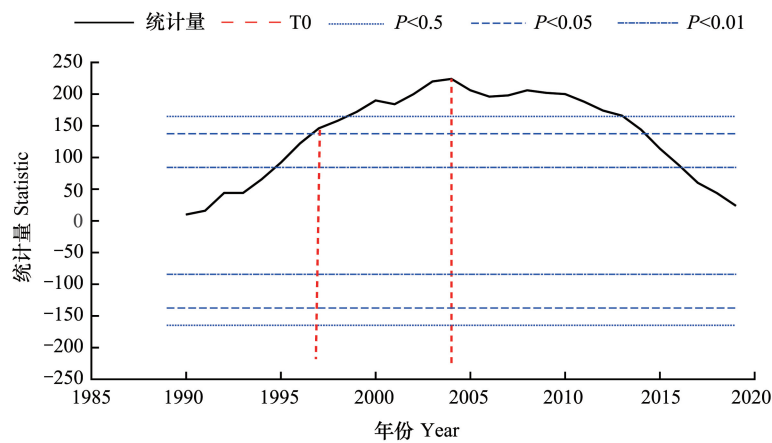


图4 茹河流域输沙量变化突变点

Fig.4 Sudden change point of sediment transport change in the Ru River basin

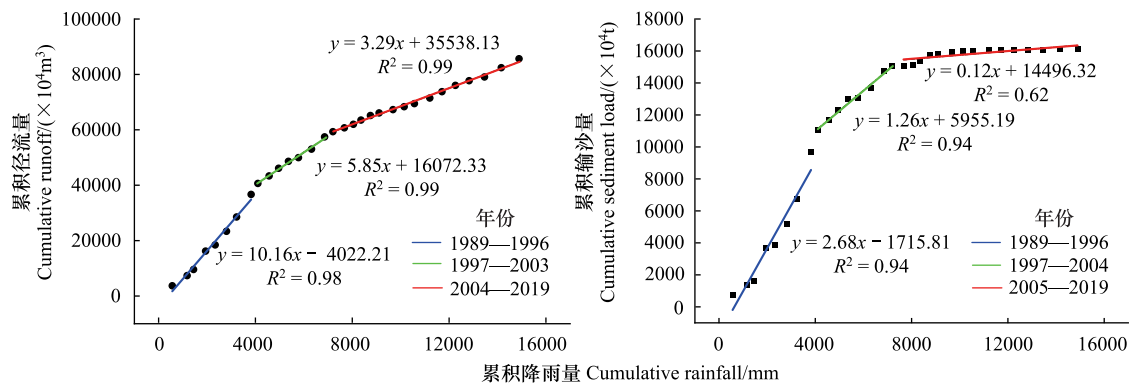


图5 茹河流域降雨量-径流量、降雨量-输沙量双累积曲线

Fig.5 Double accumulation curves of Precipitation-runoff and Precipitation-sediment transport in the Ruhe River Basin

表 2 降雨和人类活动对径流量影响分析结果

Table 2 Analysis results of the impact of rainfall and human activities on runoff

年份 Year	年均降雨量 Average annual precipitation/mm	年均径流量 Average annual runoff/10 ⁴ m ³		降雨影响 Precipitation impact		人类活动 Human activity	
		实测值	计算值	减少量/10 ⁴ m ³	贡献率/%	减少量/10 ⁴ m ³	贡献率/%
1989—1996	477.79	4584.47	4351.55				
1997—2003	433.67	2967.95	4410.02	58.47	4.05	1383.59	95.95
2004—2019	501.99	1762.95	5102.23	750.69	22.48	2588.59	77.52

表 3 降雨和人类活动对输沙量影响分析结果

Table 3 Results of analysis on the effects of rainfall and human activities on sediment transport

年份 Year	年均降雨量 Average annual precipitation/mm	年均输沙量 Average annual sediment transport/10 ⁴ t		降雨影响 Precipitation impact		人类活动 Human activity	
		实测值	计算值	减少量/10 ⁴ t	贡献率/%	减少量/10 ⁴ t	贡献率/%
1989—1996	477.79	1210.99	1070.15				
1997—2004	433.67	724.10	1166.01	95.86	21.69	346.05	78.31
2005—2019	501.99	84.27	1349.70	279.55	22.09	985.88	77.91

3.2 人类活动对水沙变化影响的主控因子

人类活动对流域水沙变化的影响复杂多变,对径流的影响主要是通过改变土地利用方式影响气候和下垫面条件,以及农田灌溉、城市建设等直接影响水文循环和水量平衡等;对输沙量的影响主要是通过修建淤地坝、进行植被恢复等达到减沙的目的。因此为了能够更好的进行水土流失控制,达到蓄水保土,减少径流量与输沙量的目标,对人类活动影响水沙变化的具体措施进行研究是有必要的。本研究通过走访调研、阅读相关文献,查阅统计年鉴资料^[10,18],最终选取经济因素、社会因素、生态因素等三类人类活动因素共 16 个指标来综合研究茹河流域水沙变化的响应关系,具体指标含义如表 4 所示:

表 4 影响因子指标评价体系

Table 4 Impact factor index evaluation system

影响因素 Influencing factors	影响因子 Impact factor	指标含义 Indicator meaning
经济因素 Economic factors	GDP/亿元	经济因素是评估水沙变化的基本因素,随着经济的快速发展,能够提供为流域水土流失治理提供经济支持,另一方面,也可以现出流域水土流失治理的经济效益 ^[10] 。
	水利环境投资占比/%	
	工业总产值/万元	
	农林牧渔总产值/万元	
	农作物播种面积/hm ²	
社会因素 Social factors	农村收入变化率/%	社会人口的变化直接影响着地区用水量,对径流量的改变具有显著作用,且能间接影响输沙量的变化,水利环境行业就业人口能够直接体现流域水土流失治理投入的人力资源 ^[10] 。
	总人口/人	
	人口密度/(人/hm ²)	
	人口自然增长率/%	
生态因素 Ecological factors	水利、环境就业人数/人	生态措施、土地利用、植被覆盖度等因素是进行水土流失治理过程中常用的治理措施,通过分析各种指标的影响能够为进一步流域治理的生态方向提供支持 ^[18] 。
	淤积库容/m ³	
	植被覆盖度/%	
	耕地面积/km ²	
	林地面积/km ²	
	草地面积/km ²	
	水域面积/km ²	

3.2.1 随机森林回归拟合验证

将研究中影响径流量和输沙量的全部因子作为自变量,径流量和输沙量分别作为因变量进行随机森林回归分析;计算随机森林回归模型得到的径流量、输沙量拟合值与实际统计值的 R^2 和 MAE 值。随机森林回归模型预测值与实测值分析验证结果如图 6 所示,径流量拟合的 R^2 和 MAE 值分别为 0.98、235.46;输沙量拟合的 R^2 和 MAE 值分别为 0.98、41.99。拟合曲线的 R^2 均达到了 0.98,表明随机森林回归拟合结果接近实际,具有可靠性。

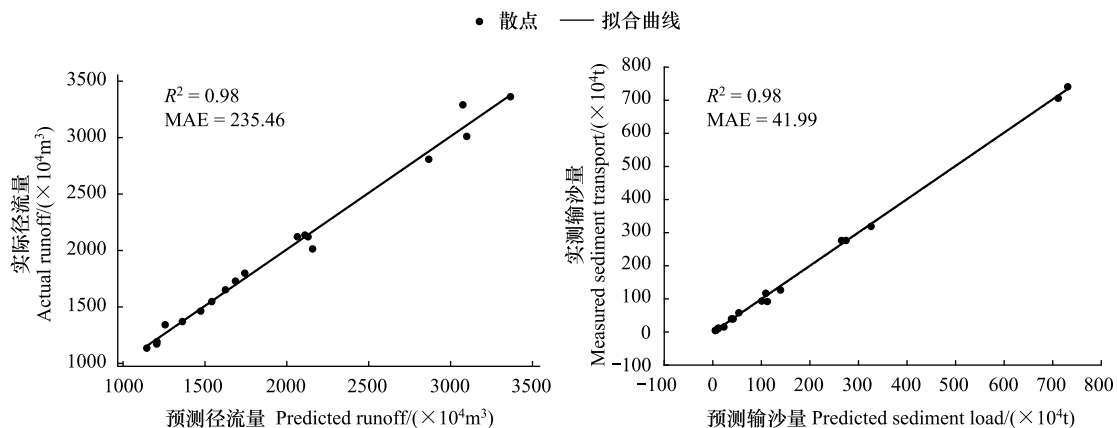


图 6 随机森林回归模型拟合验证

Fig.6 Random forest regression model fitting verification

3.2.2 影响水沙变化的主控因子识别

基于随机森林的预测模型与径流量、输沙量进行拟合,通过绘制 16 个影响因子的预测误差减少百分比 (IncMSE),探究了各影响因子对径流量、输沙量的相对重要性(图 7)。当随机排列影响因子时,对径流量影响最大的因子是农作物播种面积,IncMSE 为 20.88%,其次是耕地面积(20.85%)、草地面积(18.93%)及人口密度(14.35%);对输沙量影响显著的因子是植被覆盖度(21.95%)、水利环境投资占比(20.25%)、人口密度(15.63%)及工业总产值(14.75%)。径流量与输沙量影响因子差异较大,差异最显著的因子为水利环境投资占比。

3.2.3 主控因子与水沙变化的响应关系

基于随机森林回归模型,针对显著影响径流量前四项因子分析影响因子对径流量变化的影响强度(图 8),结果显示,农作物播种面积和耕地面积的变化与径流量的影响均呈现出显著正相关关系,草地面积和人口密度与径流量的响应关系为显著负相关。农作物播种面积和耕地面积对影响径流量变化过程中的作用相似,近年来农作物播种面积和耕地面积显著减少,在耕地面积减少至 450—500km²以及农作物播种面积减少至 45000—55000hm²时,对径流量的减小影响最大,流域草地面积持续增长,草地面积增长至 980—1200km²时保水效果达到理论效果最佳,继续增长易造成反作用;人口密度在 0.6—0.65 人/hm² 之间时径流量达到最小,人口密度降低至 0.6 人/hm² 以下时易导致径流量迅速增加。

输沙量影响因子排序前四的因子对输沙量影响的影响强度(图 9)显示,植被覆盖度、水利环境投资占比、工业总产值等因子变化与输沙量变化呈现出显著负相关关系,人口密度与输沙量呈现出显著正相关关系。植被覆盖度小于 50%时,输沙量变化较大,植被覆盖度大于 60%时,输沙量变化趋于稳定,表明植被的减沙效益显著,但是仅植被措施对输沙量变化受到限制;水利环境投资占比在 10%—30%时以及工业总产值大于 50000 万元时减沙效果最好,且趋于稳定;茹河流域人口流失严重,当人口密度达到 0.6 人/hm²时输沙量较小,随着人口的减少,可用耕地被遗弃,废弃农田中自然植被的恢复将改变土壤的水力特性,从而改变泥沙的输送过程。

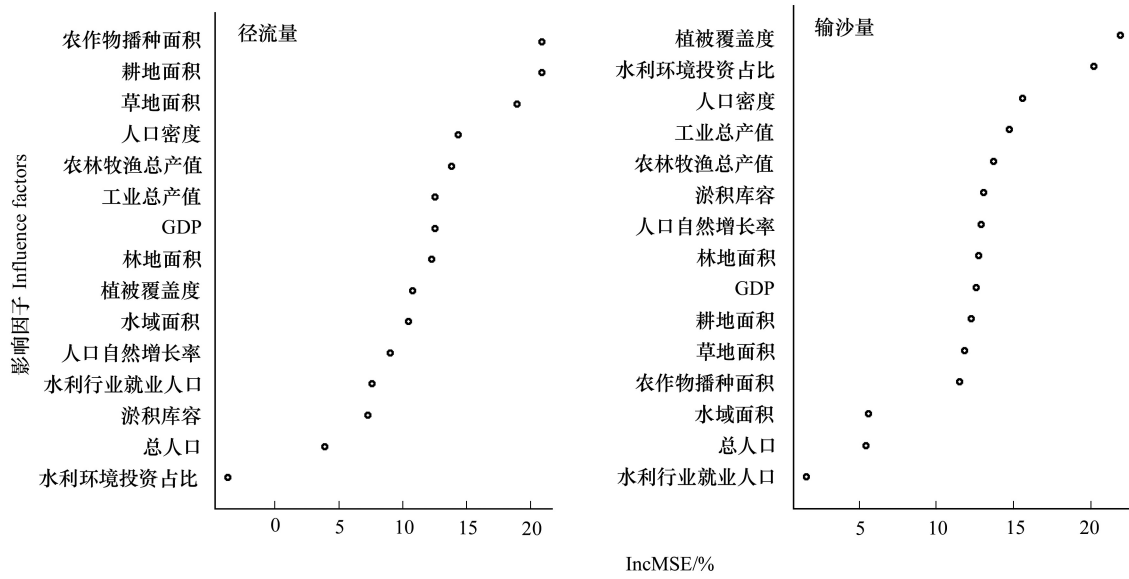


图 7 水沙变化影响因素重要性排序

Fig.7 Ranking of the importance of factors affecting runoff and sediment changes

IncMSE 为精度平均减少值, 指将变量随机取值后进行随机森林模型估算误差相对于原来误差的升高幅度; IncMSE 值越大, 说明该变量越重要

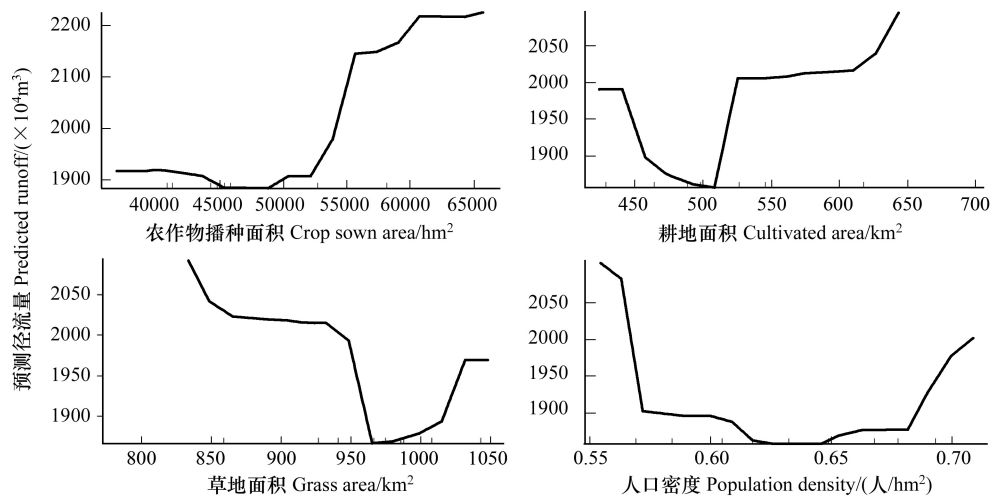


图 8 农作物播种面积、耕地面积、草地面积及人口密度对径流量变化的影响强度

Fig.8 Influence intensity of crop sown area, cultivated land area, grassland area and population density on the change of runoff

4 讨论

茹河流域径流量和输沙量峰值对应情况良好, 整体呈现出下降趋势, 但在 2012 年之后径流量和输沙量呈现出明显分异, 径流量逐渐增加, 输沙量平稳减小, 这与泾河流域水沙变化趋势相一致^[27]。水沙变化是降雨和人类活动共同作用的结果^[28-29], 降雨是流域产沙的主要驱动力^[30], 在不同时期的降雨和人类活动对水沙变化的贡献率亦有差异。通常认为, 降雨等气候因素的贡献率不断降低, 人类活动的贡献率持续增加^[27, 31]。本研究结果表明, 人类活动对径流量和输沙量减少贡献率虽然仍远大于降雨量的贡献率, 但是人类活动的贡献率在缓慢降低, 这与前人研究略有不同^[31]。这一现象说明, 在针对现阶段流域水沙的控制中, 传统的水土

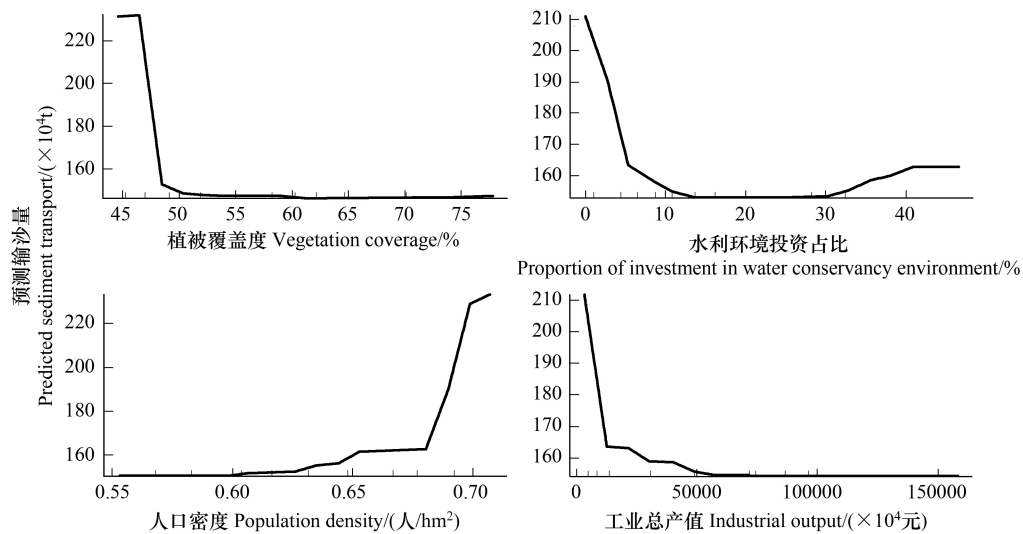


图9 植被覆盖度、水利环境投资占比、人口密度、工业总产值对输沙量变化的影响强度

Fig9 Influence intensity of vegetation coverage, proportion of water conservancy and environmental investment, population density, and gross industrial output value on changes in sediment transport

保持措施存在了一定的不足,需要深入探究具体的人类活动对流域水沙变化的影响来为水土保持措施的改进提供指导。

人类活动对径流量和输沙量的影响复杂多变,国家实施退耕还林政策以来,茹河流域农作物播种面积和耕地面积持续减少,造成林草地面积的持续增加,使得更多的降雨被植被冠层截留,密集的凋落物能够拦截径流、延缓径流流速^[32],一小部分降雨对地下水进行补充,其余降雨通过蒸散作用排入大气^[33],使得径流量持续减少^[34]。另外,人口密度的减小导致废弃耕地的增加,弃耕农田得以自然恢复,生长的草地和灌木丛等植被与农田相比增加了入渗能力,使得径流量进一步减小。

茹河流域径流量的变化进一步对输沙量变化造成影响。退耕还林、植树种草等措施增大了林草植被覆盖度,更多的植被通过减少雨滴的动能,能够使输沙量显著减小^[35]。在经济建设和工业扩张阶段,大规模基础设施建设导致地表植被遭到了很大程度的破坏,造成了严重的土壤侵蚀和泥沙输移。随着经济的发展和工业现代化的建设,茹河流域的机械化水平得以提升,人们利用经济发展和科技成果来恢复流域的生态环境,一方面水利投资能够增加水土保持建设,如修建梯田、淤地坝等工程措施来抑制水土流失,减少输沙量,另一方面,传统工业向绿色工业的转变,促进了茹河流域的生态恢复。经济发展带来了大量的就业机会,越来越多的年轻人选择在城市就业、创业,农村人口流失严重^[36],农村劳动力的减少,降低了对耕地的需求,废弃农田得以自然恢复,产生的草地和灌木丛改变了土壤的水力特性^[37],影响了径流和泥沙的输送过程,流域的保水固土能力得以提高^[38]。

影响径流量、输沙量变化的显著因子存在差异,其中最显著的差异为水利环境投资占比。茹河流域干旱缺水,在水沙治理过程中主要是以治沙为主,因此水利环境投资对输沙量变化的影响相对较大。虽然径流量与输沙量显著影响因子略有不同,但是揭示的水土流失未来治理方向确趋于一致,均反映出单因子作用下并不能到最佳的固水保土效果,如:农作物播种面积减少控制径流量减少至最小值为 1900 万 m^3 ;草地面积控制径流量减少至最小值为 1850 万 m^3 ;植被覆盖度、水利环境投资占比、人口密度、工业总产值等单因子作用下控制输沙量减少至 140 万 t 时趋于稳定。因此,现阶段水土流失治理需要结合经济—生态—社会等因素进行综合治理。

5 研究结论

本研究定量分析了茹河流域降雨量和人类活动对径流量、输沙量变化的贡献率,探索了影响因子与水沙

变化的响应关系。得到以下结论:

1) 1989 年—2011 年间, 茹河流域年径流量、输沙量变化趋势基本一致、峰值对应情况良好, 重叠度较高, 最大径流量为 1996 年的 8135 万 m^3 , 最大输沙量为 1996 年的输沙量 2969 万 t, 均呈现出明显减小趋势; 但在 2012 年之后径流量和输沙量结果出现明显差异, 径流量明显增大, 而输沙量平稳减小。

2) 茹河流域径流量突变点为 1996 年、2003 年, 输沙量突变点为 1996 年、2004 年, 影响期的两个阶段中, 人类活动对径流量的贡献率分别为 95.95% 和 77.52%, 对输沙量的贡献率分别为 78.31% 和 77.91%。

3) 随机森林回归模型通过预测误差减少百分比 (IncMSE) 对各影响因子进行重要性排序, 得到对径流量影响重要的前四个指标为降雨量、耕地面积、农作物播种面积、草地面积, IncMSE 值分别为 58.92%, 56.67%, 54.39%, 54.19%; 对输沙量影响重要性靠前的指标为植被覆盖度、水利环境投资占比、人口密度、工业总产值, 其 IncMSE 值分别为 62.21%, 49.36%, 49.25%, 42.90%。

4) 农作物播种面积、耕地面积与径流量呈现出明显的正相关关系; 植被覆盖度、水利环境投资占比、工业总产值等因子与输沙量呈现出显著负相关关系。

经济—生态—社会等人类活动均在不同角度对径流量和输沙量产生了显著影响, 可见, 单因子作用情况下对径流量与输沙量的作用易受到限制, 现阶段的水土保持工程措施在建设时应考虑经济—生态—社会等因素的需求, 在多因素驱动下进行水土保持措施的建设。

参考文献 (References):

- [1] Wang X X. Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: an overview. *Advances in Water Resources*, 2014, 71: 209-218.
- [2] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [3] 吕振豫. 黄河上游区人类活动和气候变化对水沙过程的影响研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [4] Jiang S H, Ren L, Yong B, Fu C, Yang X L. Analyzing the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe Basin in Northern China. *Hydrology Research*, 2012, 43: 3-13.
- [5] 宁珍, 高光耀, 傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展. *生态学报*, 2020, 40(1): 2-9.
- [6] Sun P C, Wu Y P, Gao J N, Yao Y Y, Zhao F B, Lei X H, Qiu L J. Shifts of sediment transport regime caused by ecological restoration in the Middle Yellow River Basin. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134261.
- [7] 孙倩, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 张晓明, 龚珺夫. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化趋势及其主控因素的贡献率. *地理学报*, 2018, 73(5): 945-956.
- [8] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1/2): 111-126.
- [9] Shi P, Zhang Y, Ren Z P, Yu Y, Li P, Gong J F. Land-use changes and check dams reducing runoff and sediment yield on the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 984-994.
- [10] Zhong X, Jiang X H, Li L L, Xu J, Xu H Y. The impact of socio-economic factors on sediment load: a case study of the Yanhe River watershed. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2457.
- [11] Zhong X, Jiang X H, Li L L, Xu J, Xu H Y. The impact of socio-economic factors on sediment load: a case study of the Yanhe River watershed. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2457.
- [12] 张军政, 翟羽佳. 对黄河流域水土保持高质量发展的思考. *中国水土保持*, 2020(6): 5-8.
- [13] Yu Y G, Wang H J, Shi X F, Ran X B, Cui T W, Qiao S Q, Liu Y G. New discharge regime of the Huanghe (Yellow River): causes and implications. *Continental Shelf Research*, 2013, 69: 62-72.
- [14] Zhao Y F, Zou X Q, Gao J H, Xu X, Wang C L, Tang D H, Wang T, Wu X W. Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: a case study of the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 803-812.
- [15] 刘二佳, 张晓萍, 谢名礼, 陈妮, 张亭亭, 郭敏杰, 张建军. 生态恢复对流域水沙演变趋势的影响——以北洛河上游为例. *生态学报*, 2015, 35(3): 622-629.
- [16] 张建, 陈松伟. 彭阳县小河流域水沙变化趋势及影响因素分析. *中国水土保持*, 2020(12): 47-49.

- [17] Whitehead P G, Jin L, MacAdam I, Janes T, Sarkar S, Rodda H J E, Sinha R, Nicholls R J. Modelling impacts of climate change and socio-economic change on the Ganga, Brahmaputra, Meghna, Hooghly and Mahanadi River systems in India and Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 1362-1372.
- [18] 刘晓平. 无定河流域生态经济因子与水沙变化响应关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [19] 郑利林, 徐金英, 王晓龙. 随机森林算法在湿地研究中的应用. *湿地科学*, 2019, 17(1): 16-24.
- [20] 田志贵, 张志芳. 茹河流域泥沙输移特性分析. *宁夏农林科技*, 2009, 50(5): 25-26.
- [21] Yue S, Pilon P, Phinney B, Cavadias G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9): 1807-1829.
- [22] Liaw A, Wiener M. Classification and regression by randomForest. *R News*, 2002, 23(23): 18-22.
- [23] Grömping U. Variable importance in regression models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2015, 7(2): 137-152.
- [24] 冯瑞, 杨丽萍, 侯成磊, 王彤, 张静, 肖舜. 基于随机森林的陕西省西安市近地表气温估算. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(1): 102-113.
- [25] Wright M N, Ziegler A. ranger: A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R. *J STAT SOFTW*, 2017, 077(1): 1-17.
- [26] 王超, 阚媛珂, 曾业隆, 李国庆, 王民, 次仁. 基于随机森林模型的西藏人口分布格局及影响因素. *地理学报*, 2019, 74(4): 664-680.
- [27] 韩向楠. 泾河流域水沙时空分异特征及其影响因素分析[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [28] 鲍振鑫, 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 金君良, 王婕, 吴厚发. 基于水文模型与机器学习集合模拟的水沙变异归因定量识别——以黄河中游窟野河流域为例. *水科学进展*, 2021, 32(4): 485-496.
- [29] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 王友胜, 成晨, 殷小琳, 谢敏. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(21): 112-119.
- [30] Zhao Y F, Zou X Q, Liu Q, Yao Y L, Li Y L, Wu X W, Wang C L, Yu W W, Wang T. Assessing natural and anthropogenic influences on water discharge and sediment load in the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 920-932.
- [31] 王赫, 朱秀端, 林敬兰, 朱能飞, 林根根, 蒋芳市, 黄炎和, 林金石. 汀江流域长汀段水沙变化特征及其影响因素. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 122-129, 137.
- [32] 赵炯昌, 卫伟, 段兴武. 模拟降雨下黄土坡面水沙过程对 3 种灌草植被垂直结构变化的响应. *生态学报*, 2021, 41(21): 8602-8611.
- [33] Huang M B, Zhang L, Gallichand J. Runoff responses to afforestation in a watershed of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 2003, 17(13): 2599-2609.
- [34] Xu J X. Variation in annual runoff of the Wudinghe River as influenced by climate change and human activity. *Quaternary International*, 2011, 244(2): 230-237.
- [35] Toy T, Foster G R, Renard K. Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control.//: *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control*, 2002.
- [36] 王宇. 中国城市化进程与现状分析. *中国城市经济*, 2011(12): 9-10.
- [37] Baker T J, Miller S N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 100-111.
- [38] López-Moreno J I, Vicente-Serrano S M, Moran-Tejeda E, Zabalza J, Lorenzo-Lacruz J, García-Ruiz J M. Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(1): 311-322.