

半干旱区降水—土地利用变化与水沙响应关系

靳峰^{1,2}, 张富¹, 胡彦婷¹, 周蕊¹, 王玲莉¹, 唐磊¹

(1.甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2.甘肃省水利厅, 兰州 730000)

摘要:为进一步研究年降水量、土地利用方式影响年径流量、输沙量的内在机制和关系,以定西市安定区为研究区,运用 Mann-Kendall 趋势检验与突变检测法研究区域年降水量、年径流量与年输沙量的变化趋势,检测突变发生的时间;对年降水量、土地利用与年径流量、输沙量之间进行拟合和回归分析。结果表明:(1) 1957—2016 年内年降水量稍有下降且不显著($p>0.05$),年径流量、输沙量总体呈波动下降趋势且达极显著水平($p<0.01$)。年降水量、径流量和输沙量之间的关联性,1957—1985 年水沙对年降水量变化响应强烈,趋势协同性强;1986—2016 年水沙对年降水量变化响应减小,趋势协同弱化,说明研究区水沙变化受其他因素(水土保持措施)影响越来越大。(2) 未治理地中坡耕地、未利用地及其他用地逐年递减,与年径流输沙呈正相关且具有较好的指数、幂函数关系($p<0.01$);而治理地中梯田、人工造林、人工种草、封育及建设用地逐年递增,与年径流输沙呈负相关;淤地坝呈先增后维持不变,与年径流输沙呈负相关。治理地及淤地坝与年径流量、输沙量均具有较好的指数关系($p<0.01$)。该研究可为降水量、土地利用与水沙变化的内在机制研究提供一定依据。

关键词:降水量;土地利用;水沙变化;拟合关系

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0063-07

Effect of Change in Precipitation-Land Use on Runoff and Sediment Transport in Semi-Arid Areas

JIN Feng^{1,2}, ZHANG Fu¹, HU Yanting¹, ZHOU Rui¹, WANG Lingli¹, TANG Lei¹

(1.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2.Department of Water Conservancy of Gansu, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to further study the internal mechanism and relationship of effects of annual precipitation and land use patterns on annual runoff and sediment transport, Anding District, Dingxi City, Gansu Province was selected as the research area, and Mann-Kendall trend test and mutation detection method were used to study the trend of regional annual precipitation, runoff and sediment transport, and to detect the time of mutation. Fitting and regression analysis on the relationship between annual precipitation, land use and annual runoff, and sediment transport were carried out. The results show that: (1) during the period from 1957 to 2016, the annual precipitation decreased slightly and was not significant ($p>0.05$), the annual runoff and sediment transport presented the fluctuating downward trend and reached the significant level ($p<0.01$); with respect to the correlation between annual precipitation, runoff and sediment transport, from 1957 to 1985, annual runoff and sediment transport had strongly responded to precipitation changes, and the trend was highly synergistic, from 1986 to 2016, annual runoff and sediment transport had less responded to precipitation changes, and the trend was synergistically divergent, indicating that the annual runoff and sediment change in the study area was increasingly affected by other factors such as soil and water conservation measures, especially after 2001, the impact of annual precipitation was smaller; (2) the sloping farmland, unused land and other land uses in non-controlled area were decreasing year by year, which was positively correlated with annual runoff and sediment transport, the non-controlled area had the good exponential and

收稿日期:2019-08-25

修回日期:2019-11-24

资助项目:甘肃农业大学科技创新资助项目;不同措施下黄土丘陵沟壑区生态系统水土保持功能分析(GSAU-XKJS-2018~105);甘肃省水利厅甘肃省水利重点科研计划项目“甘肃中部不同尺度水保措施强度与蓄水保土效率研究”(甘水科外[2019]8号)

第一作者:靳峰(1979—),男,甘肃庄浪人,硕士,主要从事半干旱区水文和水保管理工作。E-mail:493829381@qq.com

通信作者:张富(1961—),男,甘肃定西人,研究员,主要从事不同尺度土壤侵蚀研究。E-mail:fuzhang001@163.com

power function relationships with annual runoff and sediment transport, respectively ($p < 0.01$); the terrace, artificial afforestation, artificial grass planting, enclosure and construction land in the controlled area were increasing year by year, and were negatively correlated with annual runoff and sediment transport; check dams increased at first and then remained unchanged in the channel engineering, and were negatively correlated with runoff and sediment transport, the controlled area and check dams had a good exponential relationship with annual runoff and sediment transport ($p < 0.01$). This study can provide the basis for the understanding of the internal mechanism of precipitation, land use and annual runoff and sediment transport.

Keywords: precipitation; land use; runoff and sediment change; fitting relationship

随着社会经济的不断发展,气候变化和人类活动的综合作用使得全国一些河流的径流量和泥沙量的差异显著,同时也是水沙变化的重要影响方面。气候变化主要是降水、气温、蒸发等^[1],人类活动主要是土地利用变化^[2-3]、水土保持措施^[4-5]、库坝建设^[6-7]等,其中降水量对径流量的影响最显著,而气温、蒸发等影响较小;人类活动中土地利用变化主要是通过实施一些水土保持措施减少径流量和泥沙量^[8-9],径流量和泥沙量也是水文水资源及循环的重要因素。

降水是引起水土流失的原动力,是水力侵蚀发生的前提,一般降水量与土壤侵蚀量呈正比关系^[10]。穆兴民等^[11]使用综合水文法与水保法,研究了黄河中上游水土保持措施对黄河泥沙影响,结果表明 70 年代土地利用中水土保持措施年均减沙 4 亿 t,80 年代平均减沙达到 3 亿 t;在 1970—1996 年黄河中游河龙区间的土地利用中各项水土保持措施的年均减流、减泥效益分析,发现占到这一时期流域径流和泥沙量的 4.6% 和 22.9%^[12],同时刘芳等^[13]也对河龙区间及泾、洛、渭水系的梯田进行了分析研究,表明梯田的减洪减沙效果显著。刘纪根等^[14]以鹤鸣观小流域水土保持措施对流域水沙关系进行研究发现:在小流域治理后期,降雨产流量变化率、降雨产沙量变化率均减小,随着降雨的增多,土地利用中水土保持措施对径流、产沙的影响效应增强;暴雨强度愈小,降雨量愈少,水土保持径流拦蓄作用愈显著;但降雨量愈大,泥沙拦蓄作用愈显著。同样张富等^[15-16]发现产沙主要是通过坡面径流引起的沟岸扩张和沟底下切,实施水土保持措施可有效减少泥沙量。由上述研究可看出,改变土地利用结构,即实施水土保持措施能够有效地减少小流域的径流、泥沙,消减洪峰流量,降低径流含沙量,滞后洪峰出现时间,缩短洪水历时,改变降雨产流、产沙关系。由于径流和泥沙变化受自然环境及人类活动等的耦合效应,研究降水量、土地利用措施在影响径流量、输沙量的内在机制时仍有一定的难度。

1 研究区概况

安定区地处甘肃省中部偏南,属黄河中游支流的祖厉河流域。位于 104°12'48"—105°01'06"E,35°17'54"—36°02'40"N,区域总面积为 3 638.71 km²。安定区属于温带大陆性气候,四季气候差异显著,温差较大。降水稀少而集中,截至 2016 年底,安定区年均降水量为 415.6 mm,多年平均蒸发量 1 529.4 mm。安定区干旱少雨,水土流失严重,生态环境恶劣,是贫困县(区)之一。水土流失类型主要是水力侵蚀和重力侵蚀,坡面侵蚀及沟道侵蚀较严重,常有崩塌、滑坡等现象发生,年均径流量为 4.36×10^7 m³,年均输沙量 1.05×10^7 t。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

(1) 降水量、径流量和输沙量数据。1957—2016 年降水量、径流量、输沙量数据由甘肃省水文水资源局及所属定西水文水资源局提供的年降水量数据来源定西西河、内官营、红土、青岗及周边后头湾、泉头、青岗设立的 10 个雨量观测站,使用泰森多边形法计算平均降水量。径流、泥沙数据。前期水文观测站设在岷口(1957—1999 年),2000 年后上迁到定西东河、西河,故 1957—1999 年研究区径流泥沙来源于岷口水文站观测资料,2000 年后来源于定西东河、西河水文站资料(2000—2016 年)。

(2) 土地利用措施数据。主要来源于统计年鉴数据(1957—2016 年);土地一调、二调及年度外调数据(1991 年、2005—2016 年);林业部门祥查数据(2009 年、2014 年、2016 年)及退耕还林工程(2000—2006 年、2014—2016 年);水土保持年报(1957—2016 年)及普查数据;土地利用保存数量数据(1957—2016 年)等科研成果。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 趋势分析及突变检验 Mann-Kendall 非参数趋势检验与突变检测法是对于一组时间序列数据的非参数验证方法,是由 Mann^[17]和

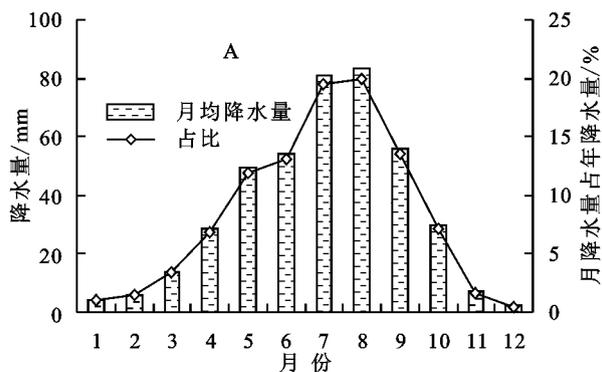
Kendall^[18]最先提出的。使用 Mann-Kendall 趋势检验与突变检测法研究区域降水量、径流量与输沙量的变化趋势,检测突变发生的时间。

2.2.2 回归分析 使用 SPSS 20.0 软件,进行降水量、土地利用与径流量、输沙量之间的回归分析。对降水量与径流输沙、沟道措施与径流输沙进行单项回归分析,对土地利用(未治理地、治理地)与径流输沙进行多元回归分析,以确定其因子对径流量、输沙量的影响大小。

3 结果与分析

3.1 降水变化特征分析

安定区年内降水量差异较大,主要集中于5—9月,属汛期降水量,占全年降水量的78.0%;尤其7



月、8月份月均降水量达80 mm以上,占总降水量的39.50%。而其他月份降水量较小,表明安定区降水量变化具有明显的季节性(图1A)。1957—2016年安定区年均降水量为415.6 mm,年均汛期降水量为354.0 mm。年最大降水量和汛期最大降水量分别为715.6 mm和604.6 mm(1967年);年最小降水量和汛期最小降水量分别为268.4 mm和209.4 mm(1997年)。汛期降水量占年降水量的80%以上,说明全年降水量集中在汛期。两者具有显著相关性, $R=0.961$ (图1B)。

年降水量趋势和突变分析可知年降水量呈减少趋势。M-K趋势检验表明(图2),1957—2001年(除1960年, $UF<0$)统计量UF为正值,说明年降水量呈上升趋势,且1967—1968年上升趋势显著($p<0.05$);2002—2016年统计量UF正负交替变化,且不显著($p>0.05$)。

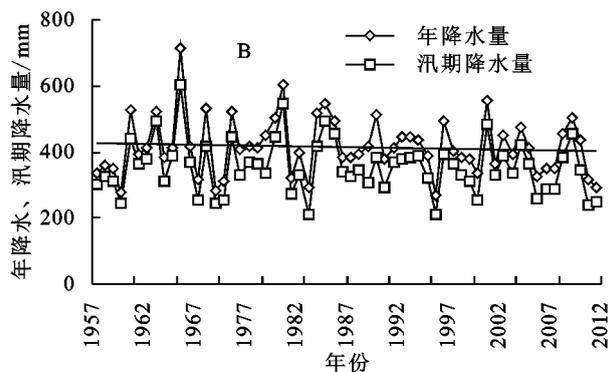


图1 降水量年内、年际变化

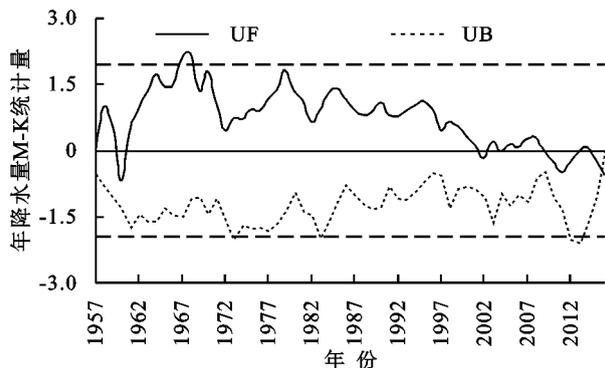


图2 年降水量 M-K 检验图

3.2 土地利用方式变化特征分析

按照是否实施水土保持措施将安定区土地利用现状分为未治理地(坡耕地、未利用地及其他用地)和治理地(建设用地、梯田、人工造林、人工种草、封育、淤地坝)两类。

3.2.1 未治理地变化特征分析 整个研究时间尺度内未治理地呈总体下降的趋势,坡耕地由1957年的14.55万 hm^2 减少为2016年的0.99万 hm^2 ,1957—1965年是增长期,1966年后则是坡耕地减少期。1991—2016年年际间未利用地及其他用地呈持续减少的趋势,由1991年的11.67万 hm^2 减少为2016年

的5.88万 hm^2 。2000年坡耕地、未利用地及其他用地下降最显著(图3A)。

3.2.2 治理地变化特征分析 在研究期内治理地总体呈上升的趋势,建设用地由1991年的1.04万 hm^2 增为2016年的1.70万 hm^2 ,年均递增速度0.03万 hm^2 ;梯田由1966年的0.38万 hm^2 增为2016年的13.17万 hm^2 ,以年均0.26万 hm^2 速度递增,其中2000年梯田增速最大;人工造林由1957年的0.017万 hm^2 增到2016年的9.21万 hm^2 ,造林面积增长最快时间段为1982—2016年;人工种草由1974年的0.10万 hm^2 增为2016年的4.21万 hm^2 ,1957—1973年为零星种草期,1974—1999年为快速上升期,2000—2016年为较稳定增长期;1985—2016年开始大规模的封育治理,以年均0.02万 hm^2 的速度增加,至2016年底,封育治理达1.17万 hm^2 (图3B)。

3.2.3 沟道工程数量变化及特征 1987—1994年建成淤地坝21座,1995—2010年建成129座,以年均8座的速度递增,2010—2016年淤地坝数量不变,至2016年共建成淤地坝155座,其中大型淤地坝81座,中小型淤地坝74座(图4)。据研究,淤地坝年均可拦蓄沟道径流120 m^3 /座,拦泥26 992 t/座^[16]。

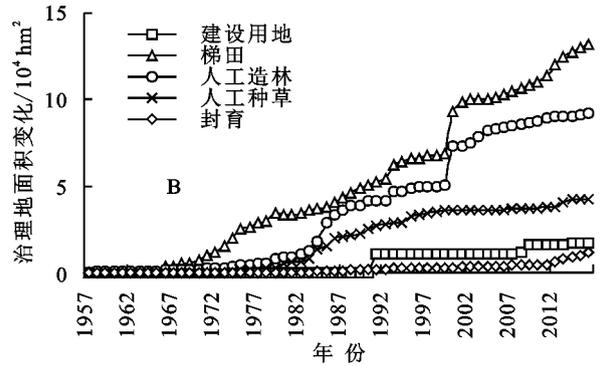
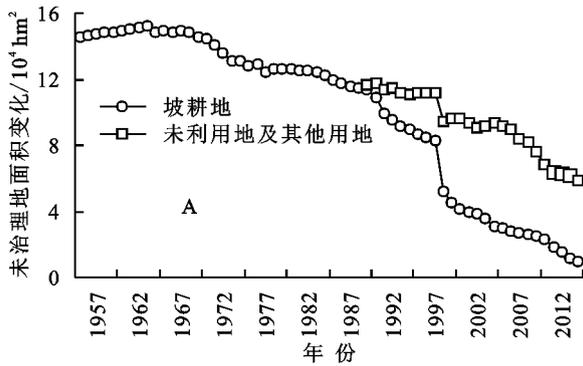


图 3 未治理地、治理地面积变化

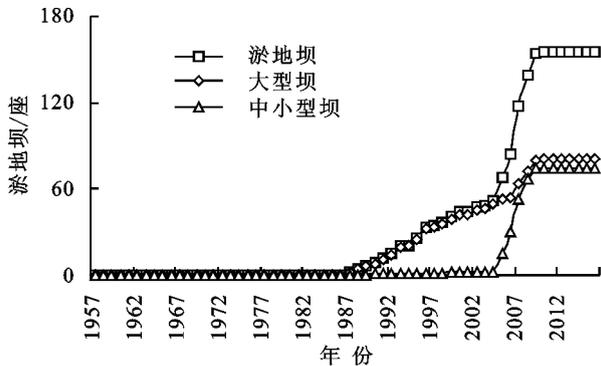


图 4 沟道工程数量变化

3.3 径流输沙量变化特征分析

由图 5A 可以看出,月径流量、月输沙量在年内变化较大,汛期径流量与输沙量主要集中于 6—9 月,

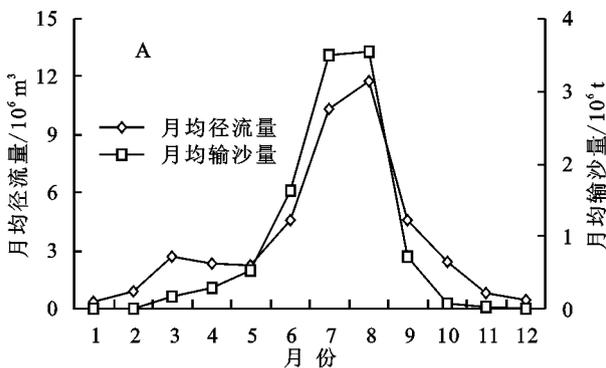
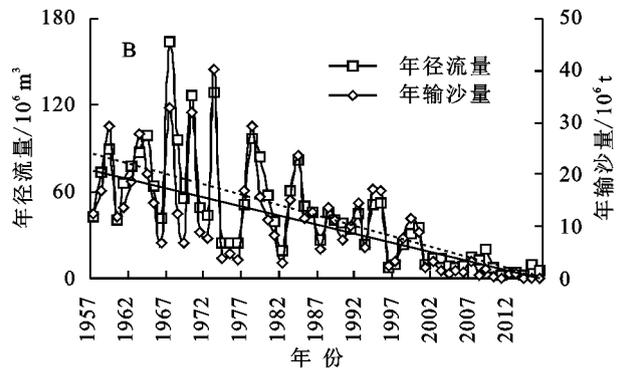


图 5 径流量与输沙量年内、际变化

对年径流量、年输沙量 M-K 非参数检验分析表明(图 6),年径流量 1957—1974 年统计量 UF' 为正值,说明年径流量呈上升趋势,没有达显著水平($p=0.05, UF'=1.73, UF' < U_{0.05}$);1975—2016 年统计量 UF' 为负值,说明年径流量下降,且 1993 年之后达极显著水平($p=0.01, UF'=-2.77, UF' > U_{0.01}$),年径流突变开始时间为 1995 年(图 6A)。就年输沙量,1957—1968 年统计量 UF'' 为正值,说明年输沙量呈上升趋势,但不显著性($p=0.05, UF''=1.57, UF'' < U_{0.05}$);1969—2016 年统计量 UF'' 为负值,说明年输沙量下降,且 2001 年之后年输沙量减少达极显著水平($p=0.01, UF''=-2.60, UF'' > U_{0.01}$),年输沙量出

占总径流量的 71.77%; 占总输沙量的 89.79%。表明汛期径流量、输沙量最大,其他时节相对较小。研究时间尺度内年径流量和输沙量随着年限的递增呈先增后减的趋势(图 5B),多年均径流量为 $4.36 \times 10^7 \text{ m}^3$,多年输沙量为 $1.05 \times 10^7 \text{ t}$;最大径流量达 $1.65 \times 10^8 \text{ m}^3$,与最大降水量出现年份(1967 年)一致,年输沙量为 $4.03 \times 10^7 \text{ t}$ (1973 年),1967 年次之,为 $3.27 \times 10^7 \text{ t}$;年最小径流量为 $2.05 \times 10^6 \text{ m}^3$ (2011 年),年输沙量为 $5.00 \times 10^3 \text{ t}$ (2016 年)。年汛期径流量占年径流量的 70% 以上(除少数年份占 70% 以下),具有显著线性相关, $R=0.941$ 。年汛期输沙量占年输沙量的 80% 以上(除少数年份占 80% 以下),具有显著相关性, $R=0.987$ 。



现突变的时间为 2002 年左右(图 6B)。

3.4 径流输沙变化影响因子分析

1957—1990 年建设用地、未利用地及其他用地数据未统计,使用 1991—2016 年的数据反推弥补其数据序列;在上述研究中发现梯田、人工种草、封育及淤地坝的数据序列缺失,为便于回归分析将其缺失值处理为 0.000 1 万 hm^2 ,在此基础上选取物理意义较简单的线性、对数、幂函数、指数函数,综合分析发现年降水量与年径流输沙均线性关系最好;未治理地与年径流指数关系最好、与年输沙幂函数关系最好;治理地、沟道工程与年径流输沙均是指数关系最好。因此,在下述只详细分析年降水量与年径流输沙的线性模型;未治理地与

年径流的指数模型、与年输沙的幂函数模型;治理地、

沟道工程与年径流输沙的指数模型。

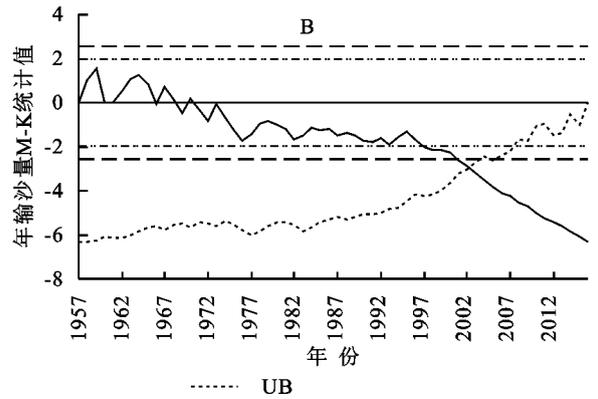
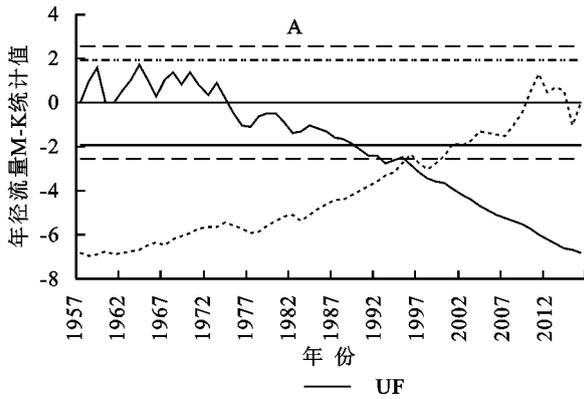


图 6 年径流量、输沙量 M-K 检验

3.4.1 降水量对年径流输沙的影响 对年降水量与年径流量、输沙量进行单相关分析,结果发现线性模型达极显著水平($p < 0.01$),且年降水量与年径流量、输沙量均呈正相关,即随年降水量的增加年径流量、年输沙量呈上升趋势。年降水量与年径流量的相关性高于年输沙量,年降水量对年径流量的决定系数达 0.255,对年输沙量的决定系数达 0.207,说明年降水量对年径流量的决定程度高于年输沙量,见表 1。

表 1 年降水量与径流输沙回归方程表

模型名称	方程	R	R ²	F
线性	$Y_1 = -11432.476 + 56.321X$	0.505	0.255	19.900
	$Y_2 = -2796.337 + 13.638X$	0.455	0.207	15.155

注: Y_1 表示年径流量($10^6 m^3$); Y_2 表示年输沙量($10^6 t$); X 为自变量(年降水量,mm); R 为相关系数; R^2 为决定系数; F 为方差检验值,下同。

3.4.2 未治理地对年径流输沙的影响 前期对未治理地与年径流输沙进行单项回归分析,发现未治理地中坡耕地、未利用地及其他用地与年径流输沙呈正相关关系,且相关性表现为坡耕地>未利用地及其他用地。对 1957—2016 年未治理地与年径流量、输沙量进行多元回归分析,结果表明未治理地与年径流量具有较好的指数关系,而未治理地与年输沙具有较好的幂函数关系,均达极显著水平($p < 0.01$)。未治理地对年径流输沙的决定系数为 0.733,而对年输沙量的决定系数为 0.789,说明未治理地对年输沙量的决定

表 3 治理地与年径流输沙回归方程表

模型名称	方程	R	R ²	F
指数	$\ln Y_1 = 5.235 - 0.956X_1 - 0.140X_2 - 0.081X_3 + 0.110X_4 + 0.025X_5$	0.860	0.740	30.792
	$\ln Y_2 = 2.954 - 0.169X_1 - 0.210X_2 - 0.191X_3 + 0.873X_4 - 4.664X_5$	0.896	0.804	44.203

注: X_i 为自变量($i=1,2,3,4,5$ 分别为建设用地、梯田、人工造林、人工种草、封育;单位为万 hm^2)。

3.4.4 沟道工程对年径流输沙的影响 淤地坝与年径流量、输沙量进行回归分析,结果表明淤地坝与年径流量、输沙量均具有较好的指数关系,均达极显著水平($p < 0.01$)。淤地坝对年径流量的决定系数达 0.809,对年输沙量的决定系数达 0.840,说明淤地坝对年径流量的决定程度低于年输沙量,淤地坝同时起

程度高于年径流量,未治理地与年径流量的指数模型更适宜,而与年输沙量的幂函数模型更适宜;就同一指数模型而言,坡耕地、未利用地及其他用地等未治理地变化更易引起年径流量的变化,见表 2。

表 2 未治理地与年径流输沙回归方程表

模型名称	方程	R	R ²	F
指数	$\ln Y_1 = 1.549 + 0.179X'_1 + 0.002X'_2$	0.856	0.733	78.050
幂函数	$\ln Y_2 = -0.813 + 2.463 \ln X'_1 - 1.050 \ln X'_2$	0.888	0.789	106.547

注: X'_i 为自变量($i=1,2$ 分别为坡耕地、未利用地及其他用地;单位为万 hm^2)。

3.4.3 治理地对年径流输沙的影响 前期对治理地与年径流输沙进行单项回归分析,发现治理地中建设用地、梯田、人工造林、人工种草、封育与年径流输沙呈负相关关系,且与年径流量的相关性表现为梯田>人工造林>封育>人工种草>建设用地;与年输沙量的相关性表现为封育>梯田>建设用地>人工造林>人工种草。对 1957—2016 年治理地与年径流量、输沙量进行多元回归分析,结果表明治理地与年径流量、输沙量均具有较好的指数关系,均达极显著水平($p < 0.01$)。治理地对年径流量的决定系数是 0.740,对年输沙量的决定系数是 0.804,说明治理地对年输沙量的决定程度高于年径流量,建设用地、梯田、人工造林、人工种草、封育等治理地变化更易引起年输沙量的变化,见表 3。

到了拦蓄径流和泥沙的作用,拦泥效果更好,见表 4。

表 4 淤地坝与年径流输沙相关性分析表

模型名称	方程	R	R ²	F
指数	$\ln Y_1 = 3.908 - 0.015X_6$	0.809	0.654	109.869
	$\ln Y_2 = 2.540 - 0.026X_6$	0.840	0.706	139.503

注: X_6 为自变量(淤地坝,座)。

4 讨论

未治理地是水土流失发生的主要策源地,开垦荒地是坡耕地面积增加的根源,坡耕地、未利用地及其他用地随梯田、人工造林、人工种草、封育治理、建设用地等的增加而迅速减少,对水土流失的防治起到了巨大的影响。治理地主要是通过实施水土保持措施来减少径流泥沙量,建设项目占地在其建设期扰动地表,会增加水土流失量,在建成后,绿地(林草地)增加、地面坡度变缓、配套水土保持措施,所以该区域的径流泥沙减少;梯田是坡面水土保持措施中调水保土效率最高、最持久措施^[16],因此大力实施坡改梯等工程有利于径流和泥沙的控制;大面积进行人工造林、人工种草对增加植被、控制坡面及沟道水土流失具有重要作用;封育治理可快速增加林草覆盖,具有显著的生态效益。由此可见,重点实施水土保持措施能大幅减少坡面及沟道水土流失。

年径流量发生突变时间为 1995 年,而这一时期前后正好是沟道工程尤其是淤地坝大量增加的时间段,淤地坝发挥了很好地拦蓄径流的作用,使年径流量下降的同时,也减少了年输沙量,且拦泥的效果更佳,拦泥淤地形成沟坝地,沟坝地大多是坡面径流冲刷地表泥沙,顺坡流下汇入沟道,具有较高的养分,是农民耕种的优良耕地。因此人类活动主要是通过水土保持措施及淤地坝工程的实施起到了很好的减水减沙效果,且输沙量减少更显著,说明调整土地利用结构,有助于拦蓄径流泥沙,减沙效果大于减流效果,本结果与夏露^[19]、秦瑞杰^[20]等在黄土丘陵区的水沙变化研究结果基本一致。且在小区即安定区进行研究时,地域因素差距基本不大,但人类活动比较活跃不断发生变化,而以大区域为研究对象时,地域因素和人类活动均可能引起年径流泥沙的变化。在进行年降水量与年径流的回归分析,建立线性、幂函数、指数、对数模型,分析发现年降水量与年径流具有较好的线性关系,达极显著水平($p < 0.01$),相关系数 $R = 0.505$,且呈正相关^[21-23],即随年降水量的增大年径流增加,年降水量对年径流的贡献率达 25.5%。Zhang 等^[24]研究祖厉河流域降水与径流之间的关系发现年降水量可解释径流变化达 30%,值有所不同且稍偏小,引起此结果的原因可能是研究区 19.57% 的西巩河径流并没有汇入此区域,年径流量有所减少引起的。

5 结论

(1) 在研究时间尺度内年降水量稍有下降且不显著($p > 0.05$),年降水量与年径流输沙呈正相关,且年降水量与年径流量的相关性高于年输沙量;年径流

量、输沙量总体呈下降趋势且达极显著水平($p < 0.01$),出现突变的时间分别为 1995 年、2002 年左右。

(2) 1957—1985 年径流量、输沙量对降水量变化响应强烈,趋势协同性强;1986—2016 年响应减小,趋势协同异化。说明水沙变化受其他因素(水土保持措施)影响越来越大,尤其是 2001 年之后受年降水量影响更小。

(3) 未治理地中呈逐年递减趋势,与年径流输沙呈正相关且具有较好的指数、幂函数关系($p < 0.01$),其变化易引起径流量的变动;而治理地呈逐年递增的趋势,与年径流输沙呈负相关且具有较好的指数关系,其变化对年输沙量更敏感;淤地坝数量先增后维持不变,与年径流输沙呈负相关且具有较好的指数关系,其拦泥较蓄水效果稍好($p < 0.01$)。

参考文献:

- [1] 姚海芳,师长兴,顾珍逵.气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响[J].干旱区地理,2018,41(3):472-479.
- [2] Tran L T, O'Neill, Robert V. Detecting the effects of land use/land cover on mean annual streamflow in the Upper Mississippi River Basin, USA[J]. Journal of Hydrology, 2013,499:82-90.
- [3] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. Catena, 2014,121:151-163.
- [4] Shi C X, Zhou Y Y, Fan X L, et al. A study on the annual runoff change and its relationship with water and soil conservation practices and climate change in the middle Yellow River basin[J]. Catena, 2013,100(2):31-41.
- [5] Jiao J Y, Wang Z J, Zhao G J, et al. Changes in sediment discharge in a sediment-rich region of the Yellow River from 1955 to 2010: implications for further soil erosion control[J]. Journal of Arid Land, 2014,6(5):540-549.
- [6] Syvitski J P M, Voeroversmarty C J, Kettner A J, et al. Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean[J]. Science, 2005,308(5720):376-380.
- [7] Wu C S, Yang S L, Lei Y P. Quantifying the anthropogenic and climatic impacts on water discharge and sediment load in the Pearl River (Zhujiang), China (1954—2009)[J]. Journal of Hydrology, 2012,452/453(10):190-204.
- [8] 王蕊,姚治君,刘兆飞.西北干旱区气候和土地利用变化对水沙运移的影响:以小南川流域为例[J].应用生态学报,2018,29(9):2879-2889.
- [9] 刘剑宇,张强,陈喜,等.气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J].地理学报,2016,71(11):5-15.

- [10] 陆绍娟,王占礼,王栋栋.喷施 Jag C162 对黄土坡面水流切应力影响研究[J].水土保持研究,2017,24(2):31-35,42.
- [11] 穆兴民,王万忠,高鹏,等.黄河泥沙变化研究现状与问题[J].人民黄河,2014,36(12):1-7.
- [12] 唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):765-774.
- [13] 刘芳,熊伟,王彦辉,等.基于 LUCC 的泾河流域景观格局与径流的响应关系[J].干旱区资源与环境,2019,33(1):137-142.
- [14] 刘纪根,任洪玉,牛俊,等.紫色土区小流域侵蚀产沙对水土保持措施的响应[J].水土保持研究,2018,25(2):29-33.
- [15] 张富,赵守德.黄丘五副区土地利用方式与土壤侵蚀关系研究[J].中国水土保持,1993(1):17-20.
- [16] 张富,姚进忠,雷升文,等.甘肃省水土保持综合治理效益研究[M].郑州:黄河水利出版社,2014:131.
- [17] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945,13(3):245-259.
- [18] Kendall M G. Rank Correlation Measures [M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [19] 夏露,宋孝玉,李怀有,等.砚瓦川流域水沙演变特征及其驱动因素分析[J].水土保持学报,2016,30(1):89-95.
- [20] 秦瑞杰,李桂芳,李平.降水和土地利用变化对罗玉沟流域水沙关系的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):32-37,43.
- [21] 艾宁,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同植被类型下降水对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):26-30.
- [22] 何杨洋,王晓燕,段淑怀,等.密云水库上游流域次降水坡面产流产沙特征[J].农业工程学报,2015,31(24):134-141.
- [23] 陈杰,刘文兆,张勋昌,等.黄土丘陵沟壑区林地水文生态效应[J].生态学报,2008,28(7):2954-2963.
- [24] Zhang F, Xing Z S, Zhao C Y, et al. Characterizing long-term soil and water erosion and their interactions with various conservation practices in the semi-arid Zulihe basin, Dingxi, Gansu, China [J]. *Ecological Engineering*, 2017,106:458-470.

(上接第 62 页)

- [2] Lai H J, Fang H W, Huang L, et al. Reible Danny. A review on sediment bioflocculation: Dynamics, influencing factors and modeling [J]. *the Science of the Total Environment*, 2018,642:1184-1200.
- [3] 栾虹,付东洋,李明杰,等.基于 Landsat 8 珠江口悬浮泥沙四季遥感反演与分析[J].海洋环境科学,2017,36(6):892-897.
- [4] 张金萍,张鑫,肖宏林.潼关水文站 1919—2015 年水沙演化特征研究[J].水电能源科学,2018,36(11):112-115.
- [5] 欧阳潮波,王文龙,田勇,等.60 年来黄河河龙区间水沙变化特征及人类活动影响评价[J].泥沙研究,2016(4):55-61.
- [6] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [7] 李万志,刘玮,张调风,等.气候和人类活动对黄河源区径流量变化的贡献率研究[J].冰川冻土,2018,40(5):985-992.
- [8] 许炯心.黄河上游内蒙古河段平滩流量对人类活动和气候变化的响应[J].地理科学,2016,36(6):837-845.
- [9] Zhao C S, Liu C M, Dai X Q, et al. Separation of the impacts of climate change and human activity on runoff variations [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015,60(2):234-246.
- [10] 樊辉,刘艳霞,黄海军.1950—2007 年黄河入海水沙通量变化趋势及突变特征[J].泥沙研究,2009(5):9-16.
- [11] 贺莉,王光谦,李铁键.黄河流域产水产沙系统的划分及中游重点区的编码[J].泥沙研究,2009(2):41-47.
- [12] 许炯心.流域降水和人类活动对黄河入海泥沙通量的影响[J].海洋学报,2003,25(5):125-135.
- [13] 杨志峰,李春晖.黄河流域天然径流量突变性与周期性特征[J].山地学报,2004,22(2):140-146.
- [14] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1998,454(1971):903-995.
- [15] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1998,79(1):61-78.
- [16] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):112-119.
- [17] 叶松,李源壮,孙永丰,等.基于经验模态分解与回归分析的空间外差光谱目标提取[J].红外与激光工程,2018,47(12):357-363.
- [18] 李强,吴健,许正文,等.利用 EMD 方法提取太阳活动周期成分[J].空间科学学报,2007,27(1):1-6.
- [19] 姜锋,丁志宏,赵焱.基于 CEEMDAN 的黑河莺落峡年径流量多时间尺度变化特征研究[J].中国农村水利水电,2018(2):64-67.
- [20] 刘志方,刘友存,郝永红,等.黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J].干旱区地理,2014,37(6):1137-1146.