

黄河中游不同水文系列长度水土流失变化及其驱动力研究¹

李敏 王富贵 高云飞

水利部黄河水利委员会黄河上中游管理局, 710021, 西安

摘要:采用回归分析方法,以1954年为起点,分别计算1954-1968年、1954-1976年、1954-1987年、1954-1997年和1954-2006年各水文系列的黄河中游水土流失变化及其驱动力。结果表明:1)以研究区年输沙量为水土流失信息载体,从47个备选自变量因子中筛选出不同的因子,计算建立了五个不同水文系列长度的回归模型,五个回归模型均较好地“解释”了五个不同水文系列研究区年输沙量的年际波动变化和长期递减变化趋势,分别揭示了不同系列长度影响黄河中游水土流失和研究区年输沙量的主要驱动力;2)在1954-1968系列,汛期(7-8月)降雨量是造成输沙量年际波动的主要驱动力,水土保持减蚀减沙驱动力湮没在汛期降雨造成的年输沙量剧烈波动中,没有得到体现;3)在1954-1976系列,水土保持减蚀减沙驱动力约相当于汛期降雨驱动力的三分之一;在1954-1987和1954-1997系列,水土保持减蚀减沙驱动力有所增加;在1954-2006系列,水土保持效能持续积累,成为减蚀减沙的主要驱动力,在减少黄河中游水土流失和研究区年输沙量中扮演了主要角色。

关键词:黄河;输沙量;水土保持;减沙;回归模型;驱动力

Study on the change of soil and water loss and its driving force in hydrological series of different lengths in the Yellow River

LI Min, WANG Fu-gui, GAO Yun-fei

Upper and Middle Yellow River Bureau, YRCC, Xi'an 710021, China

Abstract: Using the regression analysis method to calculate the change of soil erosion and the driving force in the Yellow River of 1954-1968, 1954-1976, 1954-1987, 1954-1997 and 1954-2006 respectively. Results indicated that: 1) Taking the annual sediment transport volume in the study area as the information carrier of soil erosion, different factors were selected from 47 candidate independent variable factors, and five regression models with different hydrological series lengths were calculated and established, the five regression models all "explain" the inter-annual fluctuations and long-term decline trends of the annual sediment discharge in study areas, respectively reveal the main driving forces of different series lengths affecting soil erosion and annual sediment transport in the study area of the Yellow River. 2) In the 1954-1968 series, the rainfall during the flood season (July-August) was the main driving force for the inter-annual fluctuations in sediment transport, and the driving force for soil and water conservation is annihilated in the drastic fluctuations in annual sediment transport caused by rainfall during the flood season and was not reflected. 3) In the 1954-1976 series, the driving force for soil and water conservation was approximately one-third of the driving force for rainfall during the flood season. In the 1954-1987 and 1954-1997 series, the driving force for soil and water conservation increased. In the 1954-2006 series, soil and water conservation effectiveness continued to accumulate, become the main driving force for soil erosion and sand reduction, played a major role in reducing soil erosion and annual sediment transport in the study area of the Yellow River.

Key words: Yellow River; sediment discharge; soil and water conservation; sediment reduction; regression model; driving force

黄河中游黄土高原是我国水土流失最严重的地区。在天然状态下平均每年向黄河输送泥沙16亿t。

项目名称:国家重点研发计划项目“黄河水沙变化机理与趋势预测”(2016YFC0402403)

作者简介:李敏(1952-),男,江苏省徐州市人,教授级高工。主要从事水土保持数学模型方面研究。E-mail: limin173@sina.com

通讯作者:王富贵(1964-),男,高级工程师。主要从事水水泥沙方面研究。E-mail: richie0999@qq.com

降雨和水土保持与黄河输沙量的变化紧密相关。以往在研究水土保持与黄河年输沙量的关系中，多采用水文法和水保法、按照年代划分时段进行计算 [1-5]。

降雨和水土保持对黄河年输沙量的影响遵从统计学原理。本文以黄河年输沙量作为黄河中游黄土高原地区水土流失信息的载体，采用统计学方法，在探索数据处理、分析方法等的基础上，通过建立回归模型，分析在不同水文序列尺度下黄河中游黄土高原地区水土流失和黄河年输沙量的驱动力，以期为建立黄土高原水土保持数学模型提供技术基础。

1 研究区概况

黄河中游的渭河、北洛河、汾河和黄河的河口镇（头道拐）到龙门区间的各支流是黄土高原主要区域，也是水土流失主要发生区，其中河口镇（头道拐）到龙门区间（以下简称“河龙区间”）为水土流失最严重的区域。

本研究区域为渭河（华县站）、北洛河（状头站）、汾河（河津站）和河龙区间（以下简称“研究区”）（图 1）。研究区总面积 30.05 万 km²，1954-2006 年平均年输沙量 10.60 亿 t。

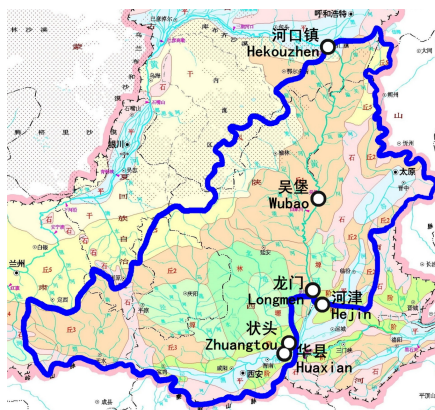


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

2 研究方法

2.1 时间区段

黄河自 1919 年设站观测，距今 101 年。本研究时段为 1954-2006 年，共 53 年，包括了 20 世纪 80 年代以前的多沙时段和 20 世纪 80 年代以后的泥沙锐减时段（图 2）。在 1954-1980 年的 27 年间，研究区黄河年输沙量居高不下，剧烈波动 [6-7]，该时段平均年输沙量超过 14 亿 t，其中有 8 个年份的年输沙量超过 20 亿 t，有 5 个年份的年输沙量超过 25 亿 t。

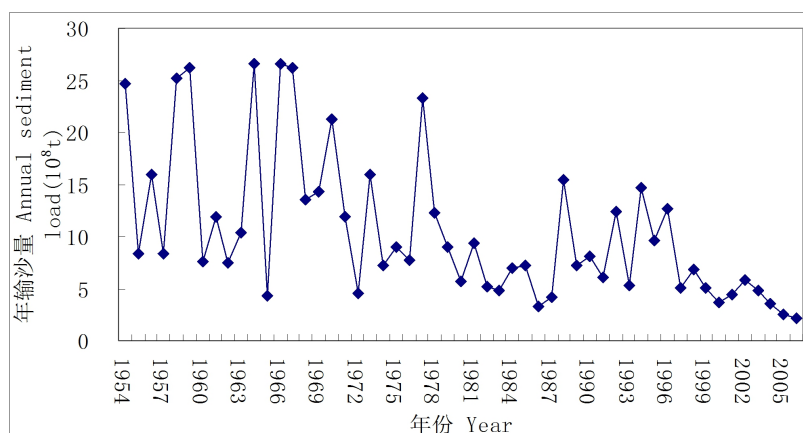


图 2 1954-2006 年研究区黄河年输沙量变化图

Fig. 2 Change of annual sediment load from 1954 to 2006 in the study area of the Yellow River

2.2 计算方法

由水文学和水土保持学知，在降雨和下垫面影响下的河历年输沙量变化遵循统计学规律。

本文采用逐步回归分析方法，对观测数据进行计算处理，筛选具有物理成因概念和含义的解释因子（自变量），选取符合水文学和水土保持学基本原理、仿真模拟效果好的计算结果，模拟和解释研究区年输沙量变化过程，分析和研究影响年输沙量变化的驱动力。

回归计算结果的准确性又称为拟合优度。判定系数（ R^2 ）是测定回归计算结果拟合优度的一个重要指标。

考虑到多元回归中自变量增加的影响，调整的判定系数为

$$R_c^2 = 1 - \frac{(n-1)}{n-p-1} (1 - R^2) \quad (3)$$

式中： n 为样本容量； p 为自变量的个数。

采用百分数表示时， R^2 乘以 100 即为该回归模型对年输沙量“解释”的程度。

2.3 影响因子初步选择与数据处理

2.3.1 降雨因子选择与数据处理

由于黄河中游黄土高原地区的水土流失主要源自河龙区间、源自汛期降雨（暴雨），因此，初步选取了研究区年降雨量，及河龙区间年降雨量、7-8 月降雨量、最大 3 日降雨量和最大 1 日降雨量等。

河龙区间是黄河中游 3 大暴雨区之一，是黄河泥沙的主要来源区。为了精细地仿真模拟年输沙量的变化，进而准确地分析研究水土保持对年输沙量的影响，将河龙区间做进一步细分为河口镇到吴堡区间片（简称“河吴区间片”，其中又划分为陕西北片和晋西北片）和吴堡到龙门区间片，其中吴堡以下又划分为无定河片、陕西南片和晋西南片^[8]。采用这些分区的 7-8 月降雨量、最大 3 日降雨量和最大 1 日降雨量等作为“解释”研究区黄河年输沙量的候选自变量。

以上共初步选择 23 个降雨因子。

考虑到 53a 系列降雨与输沙量关系的复杂性，对降雨因子进行自然对数（ln）变换，使参与计算筛选的降雨变量达到 46 个。

2.3.2 水土保持因子选择与数据处理

水土保持措施主要包括在坡面修建的梯田、种植的水土保持林草和在沟道建设的淤地坝等。为了实现数据的统一性和同一性，对各项水土保持措施采用面积单位进行计算。水土保持坡面措施的实施范围涉及淤地坝控制区域。为了避免重复计算淤地坝控制范围内的坡面措施面积，对水土保持坡面措施面积和大型淤地坝（骨干坝）坝控面积加以“耦合”与综合处理。即将核实的水土保持坡面措施面积加上大型淤地坝（骨干坝）的控制面积，再按照平均治理度，计算出大型淤地坝（骨干坝）的控制区域内的坡面措施面积，扣除这部分重叠的面积，形成“水土流失综合治理面积”。其中大型淤地坝（骨干坝）按 20 年设计淤积年限动态计算面积^[9-10]。

为了使今后不同时间和空间尺度的计算结果具有可比性，将“水土流失治理度”作为基本变量。水土流失治理度的定义为：

$$d = (A_1/A_2) \times 100\%$$

式中： d 为水土流失治理度，%； A_1 为水土流失综合治理面积， km^2 ； A_2 为水土流失面积， km^2 。

3 不同系列逐步回归计算过程描述与分析

3.1 不同系列设定描述

考虑到水文序列的统计关系和各序列间的时间间隔，本文以 1954 年为研究时段起点，分析了 5 个不同水文系列研究区年输沙量和水土流失驱动力的变化（图 5）。

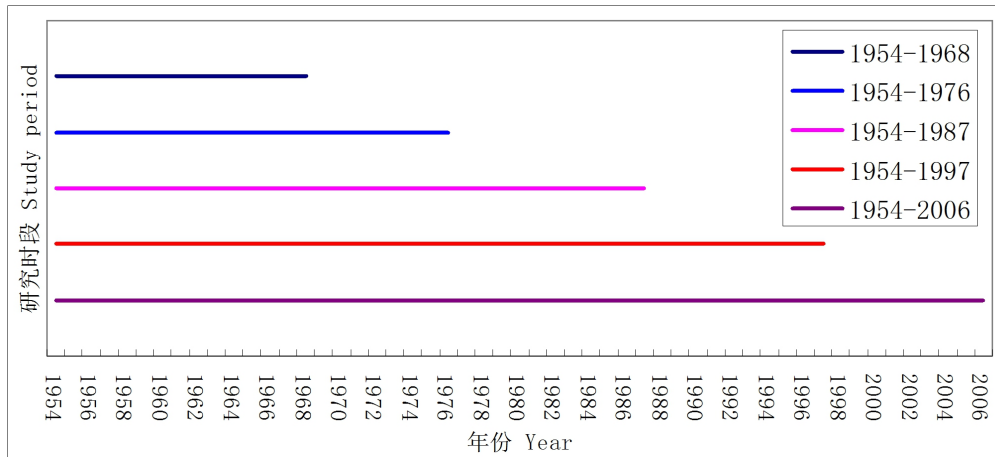


图5 研究时段示意图

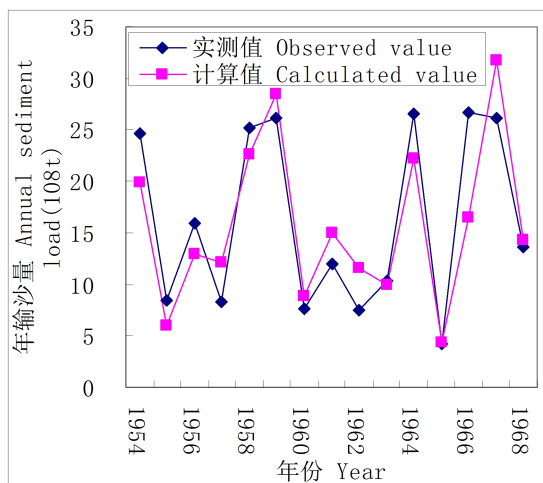
Fig.5 Schematic diagram of research period

3.2 五个系列计算结果

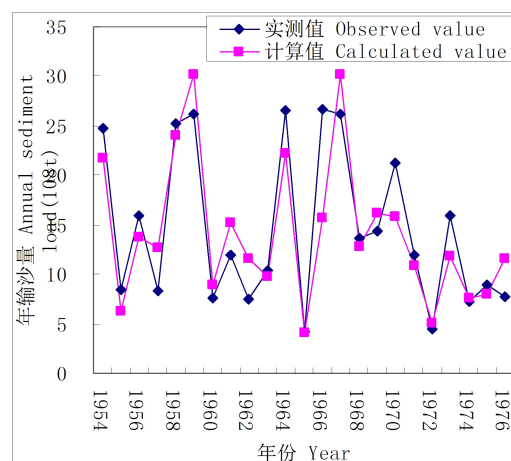
从前面的图2看出，在20世纪70年代初期以前，研究区年输沙量在高位剧烈波动发展，这一时期年输沙量平均值超过16亿t。虽然我国从20世纪50年代初期就在黄河中游黄土高原地区开展了水土流失治理工程，但是在治理初期，水土保持各项措施零星广布在水土流失区的千沟万壑中，难以形成有效的防治水土流失体系，不能稳定地减少水土流失和河流输沙量。即使对黄河输沙量有所影响，这一时期的治理效果也被“湮没”在降雨造成的剧烈波动的水土流失中，难以从统计学的角度加以识别。

在这一时期，由于下垫面向好变化处于起始时期，河流泥沙与汛期降雨关系密切。曾经对1954-1966年时段进行分析，建立了年输沙量与河吴区间7-8月降雨量的线性回归模型，相关系数达到0.89233^[11]。

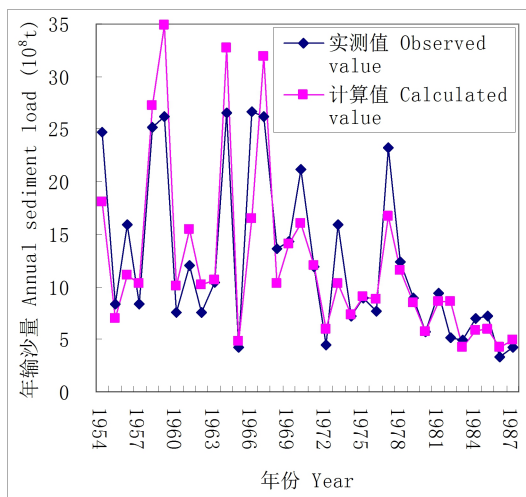
以下采用逐步回归方法，筛选出了由“ln河吴区间7-8月降雨量”1个因子组成的非线性回归模型，相关系数(R)达到0.9047（略高于1954-1966时段），在 $\alpha=0.001$ 的水平上高度显著； $R^2=0.8184$ ，表明该回归模型可以“解释”1954-1968水文系列研究区黄河年输沙量超过80%的变化。因此在1970s以前，研究区黄河年输沙量可以由汛期（7-8月）降雨量进行很好的“解释”（图6）。由于这一时期的年输沙量主要受降雨影响，一般认为其属于年输沙量的“天然”状态。相应地，这一时期影响黄河中游黄土高原地区水土流失和研究区黄河年输沙量的驱动力主要是汛期降雨。



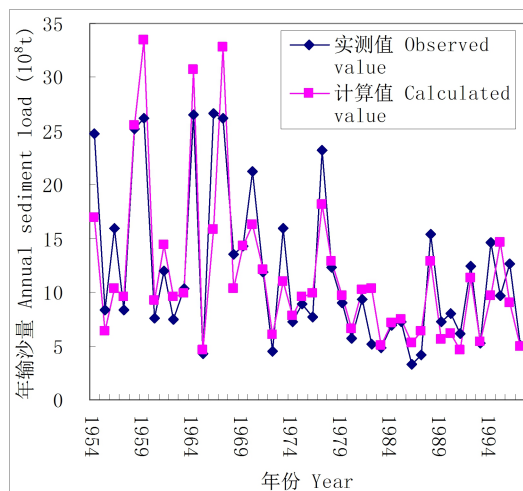
(a) 1954-1966 系列年度计算值与实测值比较 Comparison of calculated with observed annual value



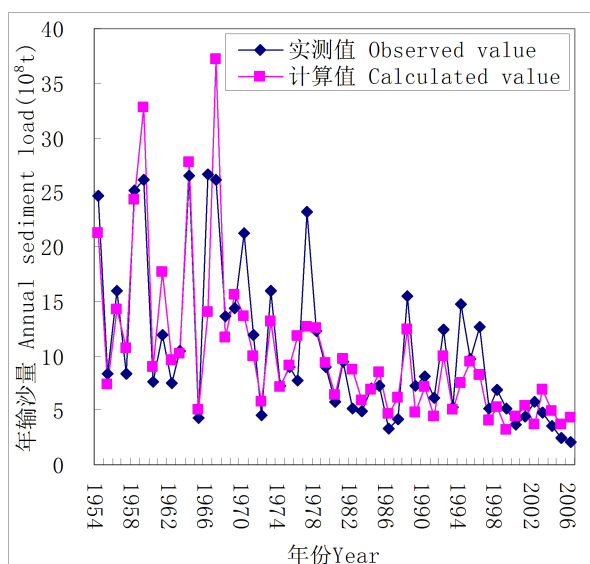
(b) 1954-1976 系列年度计算值与实测值比较 Comparison of calculated with observed annual values



(c) 1954-1987 系列年度计算值与实测值比较 Comparison of calculated with observed annual values



(d) 1954-1997 系列年度计算值与实测值比较 Comparison of calculated and observed annual values



(a) 1954-2006 系列年度计算值与实测值比较 Comparison of calculated with observed annual values

图 6 1954-1968 年回归模型计算值与实测值比较图

Fig.6 Comparison of calculated with observed values from 1954 to 1968

从1954-1968年实测年输沙量与计算年输沙量的散点图（图6（b））可以看出，数据点基本分布在 $Y=0.9364 \cdot X$ 的直线附近，说明计算量十分接近实测量。

3.2 1954-1976 水文系列

将水文系列延伸，进入1970s，情况发生了由量变到质变的变化，随着水土流失治理度的增加，水土保持对研究区黄河年输沙量的影响开始显现。逐步回归经过2次计算，筛选出了“1n 河吴区间7-8月降雨量”和“水土流失治理度”2个因子组成的非线性回归模型，相关系数（ R ）达到0.90446，在 $\alpha=0.001$ 的水平上高度显著；调整的判定系数 R^2 达到0.79985，表明该回归模型“解释”了1954-1976水文系列研究区黄河年输沙量近80%的变化。

1954-1976年实测年输沙量与回归模型计算的年输沙量比较（图7）可以看出，除了个别年份外，计算年输沙量与实测年输沙量的总体变化趋势基本一致，模拟出了研究区年输沙量“峰谷”波动的年际变化，较好地反映了研究区年输沙量在1980s以前剧烈波动的变化过程。

3.3 1954-1987 水文系列

采用逐步回归方法, 经过 3 次计算, 依次筛选出了由“河吴区间 7-8 月降雨量”、“水土流失治理度”、“河龙区间最大 1 日降雨量”等 3 个因子组成的多元非线性回归模型, 相关系数(R)达到 0.9190, 在 $\alpha = 0.001$ 的水平上高度显著; 调整的判定系数 R^2 达到 0.8290, 表明该回归模型“解释”了 1954-1987 水文系列研究区黄河年输沙量近 83% 的变化。

1954-1987 年实测年输沙量与回归模型计算的年输沙量比较 (图 8) 可以看出, 除了个别年份外, 计算年输沙量与实测年输沙量的总体变化趋势基本一致, 模拟出了研究区年输沙量“峰谷”波动的年际变化和持续递减的趋势, 较好地反映了研究区年输沙量在 1980s 及其以前剧烈波动的变化过程和 1980 年以来逐年波动递减的过程, 总体计算模拟程度较高。

3.4 1954-1997 水文系列

采用逐步回归方法, 经过 3 次计算, 依次筛选出了由“河吴区间 7-8 月降雨量”、“水土流失治理度”、“河龙区间最大 1 日降雨量”等 3 个因子组成的多元非线性回归模型, 相关系数(R)达到 0.8844, 在 $\alpha = 0.001$ 的水平上高度显著; 判定系数 R^2 达到 0.7659, 表明该回归模型“解释”了 1954-1997 水文系列研究区黄河年输沙量超过 76% 的变化。

随着水文系列的延长, 本系列包含了 1960s 和 1970s 的黄河重大降雨和泥沙事件。比较 1954-1997 年实测年输沙量与回归模型计算的年输沙量 (图 9) 可以看出, 计算年输沙量与实测年输沙量的总体变化趋势仍然基本一致, 模拟出了研究区年输沙量“峰谷”波动的年际变化和持续递减的趋势, 仍然较好地反映了研究区年输沙量在 1980 年以前剧烈波动的变化过程和 1980 年以后逐年波动递减的过程, 总体计算模拟程度较高。

从 1954-1997 年实测年输沙量与计算年输沙量的散点图 (图 9 (b)) 可以看出, 数据点基本分布在 $Y=0.9482*X$ 的直线附近, 说明计算量十分接近实测量。

3.5 1954-2006 水文系列

采用逐步回归方法, 经过 3 次计算, 筛选出了由“河吴区间 7-8 月降雨量”、“水土流失治理度”、“河龙区间年降雨量”等 3 个因子组成的多元非线性回归模型, 相关系数 (R) 达到 0.8777, 在 $\alpha = 0.001$ 的水平上高度显著; 判定系数 R^2 达到 0.7563, 表明该回归模型可以“解释”1954-1976 水文系列研究区黄河年输沙量超过 75% 的变化。

1954-2006 年实测年输沙量与回归模型计算的年输沙量比较见图 10。从图 10 (a) 可以看出, 除了个别年份外, 计算年输沙量与实测年输沙量的总体变化趋势基本一致, 模拟出了研究区年输沙量“峰谷”波动的年际变化和持续递减的趋势, 较好地反映了研究区年输沙量在 1980 年以前剧烈波动的变化过程和 1980 年以后逐年波动递减的过程, 总体计算模拟程度较高。

从 1954-2006 年实测年输沙量与计算年输沙量的散点图 (图 10 (b)) 可以看出, 数据点基本分布在 $Y=0.9357*X$ 的直线附近, 说明计算量十分接近实测量。

4 结果与讨论

4.1 各水文系列回归计算结果小结

从 1954 年开端的 5 个水文系列计算结果, 各相关系数均显示高显著性水平, 建立的各回归模型均可以“解释”该时段黄河年输沙量 75% 以上的变化 (表 1)。

表 1 不同水文系列回归模型判定系数比较

Table 1 Comparison of determination coefficients of different hydrological series regression models

水文系列	1954-1968	1954-1976	1954-1987	1954-1997	1954-2006
判定系数	0.8184	0.7999	0.8290	0.7659	0.7563

说明: 除了 1954-1968 系列为单因子回归外, 其余各系列判定系数均考虑多因子的影响。

回归方差分析结果表明, 总体上, 各时段回归的标准差绝对值均小于 3, 在设定的允许范围内。没有出现回归模型难以“解释”的“异常值”(回归标准差大于 3 的值)。

从各系列计算结果的散点图看出,在年输沙量小于20亿t时,计算值与实测值的偏差较小;在年输沙量大于20亿t时,计算值与实测值的偏差较大。

对于年输沙量大于20亿t时,计算值明显小于实测值的现象,初步分析其部分原因是暴雨损毁了部分水土保持和水利工程设施,使多年拦淤的泥沙在当年被冲入黄河,而回归模型不能够“解释”这些输沙量。例如1966年和1977年^[12]就是这种情况^[13-14]。

对于年输沙量大于20亿t时,计算值明显大于实测值的现象,例如1959年和1967年,则是该年汛期降雨量明显偏大,系列中河吴区间7-8月降雨量大于400mm只有2年,分别是1959年和1967年,回归计算中就“认为”这两个年份的年输沙量应该较大;实际上实测值虽然也超过26亿t,但是计算值仍然高于实测值。对于这种计算情况,有待进一步的分析研究。

4.2 回归模型因子分析讨论

由理论和实践知,降雨是产生水土流失和河流泥沙的因素,特别是汛期降雨;水土保持是减少黄河水土流失和年输沙量的因素。

逐步回归在因子筛选时,设定了“进入”和“剔除”的“门槛”。虽然各次计算时,进入回归模型的自变量因子与因变量间的相关关系会发生变化,但是总体上每个序列第一次“中选”的因子都是“河吴区间7-8月降雨量”(在1954-1968系列和1954-1976系列为“ln河吴区间7-8月降雨量”)。说明汛期降雨量是影响黄河水土流失和年输沙量的第一显著因子。

从1954-1976系列开始,“水土流失治理度”在第二次计算中进入回归模型;从1954-1987开始,回归模型的第三次计算又增加了“河龙区间最大1日降雨量”;在系列长度增加到53a后的1954-2006系列,第三次计算增加的因子为“河龙区间年降雨量”。

回归模型中降雨因子均显示为正值,是增加水土流失和年输沙量的驱动力;水土流失治理度显示为负值,是减少水土流失和年输沙量的驱动力。

各系列的计算结果符合“黄河泥沙主要来自河龙区间,主要来自汛期降雨和暴雨”的产沙基本规律^[15-16],符合“水土保持是黄河泥沙治本措施”的基本原理。

4.3 逐步回归计算过程讨论

五个水文系列的非线性回归模型分别进行了一次(1954-1968)、两次(1954-1976)和三次(1954-1987、1954-1997和1954-2006)自变量筛选计算。通过计算结果看出,随着水文系列的延长,回归模型的自变量个数有所增加。在自变量增加的同时,回归模型的相关系数也有所提高(表2)。逐步回归计算中,第一个进入回归模型的自变量都是“河吴区间7-8月降雨量”(1954-1968和1954-1976序列是“ln河吴区间7-8月降雨量”);该因子与研究区黄河年输沙量的相关系数显著性水平均达到 $\alpha = 0.001$;随着系列的延长,该因子的“R”由0.9047下降到0.7233,表明其对年输沙量的“解释”力逐渐降低,“驱动力”逐渐“衰减”,分析其主要原因是该因子不能“解释”年输沙量长期递减趋势。与此同时,随着系列的延长,“水土流失治理度”因子在第二次因子筛选计算时进入回归模型,使回归模型对年输沙量的“解释”能力得到提高。

采用“水土流失治理度”进入回归模型的第二次计算的相关系数减第一次计算的相关系数,其得到的差值可以看做是“水土流失治理度”对回归模型计算结果增加的相关系数值的“贡献”。该值从1954-1976的0.034,逐渐提高到1954-2006的0.1402。

第三次进入回归模型的河龙区间降雨因子对回归模型相关系数的“贡献”均在小数点后面第二位显现,可以理解为该因子是回归模型的补充因子,即使没有第三个因子,各时段的回归模型相关系数也达到0.85以上,显著性水平依然达到 $\alpha = 0.001$ 。

随着系列的延长,影响黄土高原水土流失和黄河年输沙量的因素越趋复杂,回归模型的相关系数略有降低,但是回归模型的显著性水平依然达到 $\alpha = 0.001$ 。

回归模型的计算过程再一次说明了“黄河泥沙主要来自河龙区间,主要来自汛期降雨和暴雨”的产沙基本规律与“水土保持是黄河泥沙治本措施”的基本原理。

表2 各系列逐步回归各次计算结果相关系数比较

Table 2 The correlation coefficients comparison of different stepwise regression of each series

1954-1968		1954-1976		1954-1987		1954-1997		1954-2006	
计算次数/自变量	R	计算次数/自变量	R	计算次数/自变量	R	计算次数/自变量	R	计算次数/自变量	R
1/ln 河吴区间 7-8 月降雨量	0.9047	1/ln 河吴区间 7-8 月降雨量	0.8705	1/河吴区间 7-8 月降雨量	0.8135	1/河吴区间 7-8 月降雨量	0.7924	1/河吴区间 7-8 月降雨量	0.7233
		2/ln 河吴区间 7-8 月降雨量、水土流失治理度	0.9045	2/河吴区间 7-8 月降雨量、水土流失治理度	0.8897	2/河吴区间 7-8 月降雨量、水土流失治理度	0.853	2/河吴区间 7-8 月降雨量、水土流失治理度	0.8635
				3/河吴区间 7-8 月降雨量、水土流失治理度、河龙区间最大一日降雨量	0.919	3/河吴区间 7-8 月降雨量、水土流失治理度、河龙区间最大一日降雨量	0.8802	3/河吴区间 7-8 月降雨量、水土流失治理度、河龙区间年降雨量	0.8777

4.4 标准化回归系数与驱动力分析讨论

分析计算时段系列的延长，使年输沙量的变化趋于复杂，逐步回归均增加了“解释”因子，使回归模型的自变量增加到三个。

由水土流失和河流泥沙理论知，在降雨产沙和水土保持减沙的矛盾中，降雨是产生水土流失和河流泥沙的原动力，水土保持是减少和抵消降雨产沙的驱动力。即“降雨→侵蚀→产沙”，“水保→减蚀→减沙”。具体到回归模型中，各自变量因子系数的大小“相对”表达了其对水土流失和年输沙量增减驱动力的大小与“方向”。降雨因子均为正值，显示其为增加水土流失与河流泥沙数量变化的“正方向”；水土流失治理度因子为负值，显示了其为减少水土流失与河流泥沙数量变化的“负方向”。

计算结果表明，对于不同的时间尺度，各自变量对水土流失和年输沙量表现的“驱动力”不尽相同。为了比较各自变量在各水文系列回归模型中的“驱动力”大小，同时分析不同时段相同自变量“驱动力”的变化，计算出各自变量的标准化回归系数，消除不同量纲的影响，使回归模型中的不同自变量之间具有“相对可比性”。故此以下将回归模型各自变量标准化回归系数定义为“驱动力”。

标准化回归系数=未标准化回归系数*该自变量的标准差/因变量的标准差。

设，因变量 y ，自变量 x_i 的非标准化系数为 β_i ，则一般情况下，其标准化系数为：

$$\beta'_i = \beta_i \times \frac{s_{x_i}}{s_y}$$

式中 s_{x_i} 是 x_i 的标准差， s_y 是 y 的标准差。

观察各次计算结果中自变量的标准化回归系数（表 3）进行观察：除了 1954-1968 系列只计算了一次外，其余各系列均计算了 2-3 次。其中在各系列的第二次计算中，“水土流失治理度”进入回归模型，其标准化回归系数绝对值均小于“河吴区间 7-8 月降雨量”；但是随着研究系列的延长，其标准化回归系数绝对值从 0.246 增加到 0.4862（1954-1997 系列略有降低）。

表 3 不同系列回归模型各自变量标准化系数

Table 3 The standardized coefficients of the variables of the regression models in different series

计算次数	自变量	1954-1968	1954-1976	1954-1987	1954-1997	1954-2006
		标准化回归系数	标准化回归系数	标准化回归系数	标准化回归系数	标准化回归系数
1	河吴区间 7-8 月降雨量	0.9047	0.871	0.8135	0.7959	0.7233
2	河吴区间 7-8 月降雨量		0.861	0.7104	0.7538	0.6055

	水土流失治理度	-0.246	-0.3746	-0.3239	-0.4862
	河吴区间 7-8 月降雨量		0.5269	0.5853	0.4422
3	水土流失治理度		-0.3765	-0.3055	-0.4682
	河龙区间最大一日降雨量/河龙区间年降雨量		0.2942	0.2741	0.2305

注：1. 1954-1968 和 1954-1976 为“ln 河吴区间 7-8 月降雨量”。2. 1954-2006 为“河龙区间年降雨量”。

对各系列第二次计算结果的两个自变量标准化回归因子绝对值进行比较（图 11）发现，随着水文系列的延长，“河吴区间 7-8 月降雨量”标准化回归系数有下降的趋势，相应地，“水土流失治理度”的标准化回归系数绝对值则出现增加趋势。其中，1954-2006 系列，在第二次计算结果中，两个因子的标准化回归系数十分接近。

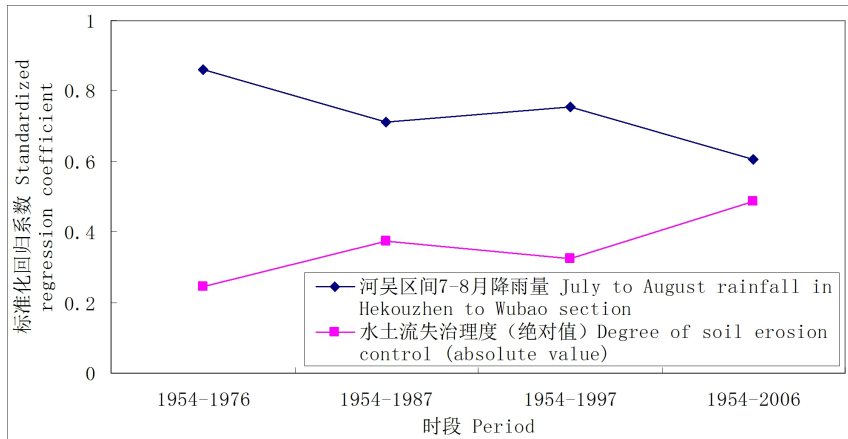


图 11 不同系列回归模型第二次计算结果两个自变量标准化系数绝对值比较

Fig.11 Comparison of absolute values of standardized regression coefficients between two independent variables at second calculation results of the regression models in different series

在 1954-2006 系列的第三次计算结果中，“水土流失治理度”的标准化回归系数绝对值大于“河吴区间 7-8 月降雨量”（表 3），成为减少水土流失和年输沙量的主要驱动力。

在 1954-1987、1954-1997 和 1954-2006 三个序列的第三次计算结果中，增加了河龙区间降雨因子，其中 1954-1987 和 1954-1997 系列为“河龙区间最大一日降雨量”，1954-2006 系列为“河龙区间年降雨量”。河龙区间各降雨因子的标准化回归系数均是最小。

5 结论

1) 依据水土保持和降雨与黄河年输沙量间的统计学关系，采用回归分析方法，建立的五个水文系列回归模型，均较好地“解释”了 1954-1968 年、1954-1976 年、1954-1987 年、1954-1997 年和 1954-2006 年黄河研究区年输沙量的年际波动变化和长期递减变化趋势，五个回归模型分别揭示了不同水文系列长度影响黄河中游水土流失和研究区黄河年输沙量的主要驱动力。

2) 1954-1968 年汛期降雨是产生水土流失和年输沙量的主要驱动力。此时段水土保持尚未形成规模，难以从统计学角度鉴别其对黄河中游水土流失和研究区黄河年输沙量的影响力。

3) 随着水文系列的逐渐延长，水土保持减少水土流失、对黄河年输沙量影响的功效不断积累，1954-1976、1954-1987、1954-1997 和 1954-2006 年时段水土流失治理度逐步提高，形成规模，成为减少黄河中游水土流失和研究区黄河年输沙量长期递减趋势的主要驱动力。

参考文献

[1] 熊贵枢.黄河流域水利水保措施减水减沙分析方法简述[J].人民黄河, 1994,11:33-36

- [2] 汪岗, 范昭.黄河水沙变化研究.第二卷[M].郑州: 黄河水利出版社, 2002.9: :198-340
- [3] 冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等.黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.5:40-203
- [4] 张胜利, 李倬, 赵文林.黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.1:142-178
- [5] 刘万铨.黄河流域水土保持减沙效益计算几项基本原则的探讨[J].人民黄河, 1996.12: 41-44
- [6] 水利部, 中国科学院, 中国工程院.中国水土流失防治与生态安全.西北黄土高原区卷[M].北京: 科学出版社, 2010:63-67
- [7] 陈先德.黄河水文[M].郑州: 黄河水利出版社, 1996.10:80-88
- [8] 徐建华, 李晓宇, 陈建军, 等. 黄河中游河口镇至龙门区间水利水保工程对暴雨洪水泥沙影响研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009: 73-74
- [9] 中华人民共和国水利部.水土保持治沟骨干工程技术规范[M].北京: 新华出版社, 2003.12:2
- [10] 李敏, 王富贵. 黄河河龙区间年输沙量的仿真模拟 [J]. 人民黄河, 2013, 4: 37-40
- [11] 李敏,朱清科. 20世纪中期以来不同时段黄河年输沙量对水土保持的响应研究[J].中国水土保持科学,2019,10:1-8
- [12] 黄河中游水文水资源局.黄河中游水文(河口镇至龙门区间)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.10:54-55
- [13] 黄河水利委员会, 黄河中游治理局.黄河水土保持志[M].郑州: 河南人民出版社, 1993.12:284-287
- [14] 黄河上中游管理局.淤地坝试验研究[M].北京: 中国计划出版社, 2005:60
- [15] 胡一三.中国江河防洪丛书.黄河卷[M].北京: 中国水利水电出版社, 1996.8: 124-129
- [16] 赵文林.黄河泥沙[M].郑州: 黄河水利出版社, 1996:48