

水土保持对黄河输沙量的影响

李敏

(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,研究水土保持对1954—2005年黄河年输沙量的影响。结果表明:1)从24个备选自变量因子中筛选出的由“河口镇到吴堡区间7—8月降雨量”“水土流失治理度”和“ln‘河口镇到龙门区间年降雨量’”3个自变量组成的多元非线性回归方程,相关系数达到0.883,在 $\alpha=0.001$ 的水平上高度显著,该回归方程“解释”了1954—2005年黄河年输沙量76.5%的变化;2)水土流失治理度能够很好地“解释”20世纪80年代以来黄河年输沙量减少的趋势;3)当河口镇到吴堡区间7—8月降雨量处于最大观测值时,水土流失治理度由0增加到50%,计算年输沙量减少幅度超过20亿t/a;4)治理程度相同时,水土保持对黄河年输沙量的影响是降雨量大的大于降雨量较小的。

关键词: 输沙量;水土保持;减沙;黄河

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-3007(2014)06-0023-07

Effect of soil and water conservation on sediment discharge in the Yellow River

Li Min

(Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, 710021, Xi'an, China)

Abstract: This study was targeted to explore the effect of soil and water conservation on the annual sediment discharge in the Yellow River during the period of 1954 to 2005 using the regression analysis method. Results indicated that: 1) Three out of 24 optional independent variables, i. e., “rainfall from July to August in the section of Hekouzhen to Wubao”, “controlled percentage of soil erosion” and “ln ‘annual rainfall in the section of Hekouzhen to Longmen’” were screened out to form a multivariate nonlinear regression equation. The correlation coefficient (R) reached 0.883, highly significant at $\alpha=0.001$ level. The regression equation “explains” 76.5% of the change of annual sediment discharge during the 1954—2005 period in the Yellow River. 2) Controlled percentage of soil erosion can be a good “explanation” of the decline in annual sediment discharge in the Yellow River since the 1980s. 3) When the July–August rainfall in the section of Hekouzhen to Wubao was at the maximum observed value, controlled percentage of soil erosion increased from 0 to 50%, and reduction rate of calculated annual sediment yield was over 2 billion tons. 4) At the same level of the soil and water conservation, the impact of soil and water conservation on the sediment load in the Yellow River in larger rainfalls is greater than that in smaller rainfalls.

Keywords: sediment discharge; soil and water conservation; sediment reduction; Yellow River

黄河输沙量的变化历来是研究的重点,其中研究水土保持与黄河年输沙量的关系更是重点中的热 点。以往在科研与生产上多采用水文法和水保法,按照年代划分时段进行计算^[1-5]。

收稿日期: 2013-11-30 修回日期: 2014-09-23

项目名称: 中国科学院重点部署项目“近百年来黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03);国家自然科学基金“延河流域水沙变化及其对退耕还林草的响应”(41271295),“渭河流域水土流失对土地利用变化的尺度响应与模拟研究”(41371277)

作者简介: 李敏(1952—),男,教授级高工。主要研究方向:水土保持数学模型。E-mail: limin173@sina.com

由于受自然和人类活动的干扰,水土保持对河流输沙量的影响遵从统计学原理。笔者在探索数据处理、分析方法等的基础上,通过建立回归方程,分析水土保持措施对黄河年输沙量的长期影响趋势,以期建立黄河流域水土保持数学模型提供技术支持。

1 研究区概况

黄河泥沙基本来自流经黄土高原地区的渭河、北洛河、汾河和河口镇(头道拐)到龙门区间的各支流,其中主要产沙区域为黄河的河口镇(头道拐)到龙门区间(以下简称“河龙区间”)。

本研究区域为渭河(华县站)、北洛河(淤头站)、汾河(河津站)和河龙区间(以下简称“4站区域”)(图1)。4站区域总面积30万500 km²,1954—2005年平均年输沙量10亿7600万t。

2 研究方法

2.1 时间区段

黄河自1919年设站观测,距今不到100年。本研究时段为1954—2005年,共52年,包括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,4站区域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。

2.2 计算方法

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

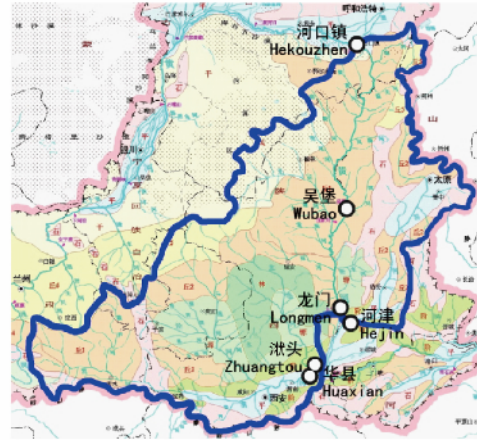


图1 研究区域示意图

Fig. 1 Location of the study area

理、仿真模拟效果好的计算结果,模拟和解释输沙量变化过程,分析和研究水土保持对输沙量的影响。

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。

从回归分析原理知,输沙量的计算值与实测值之间存在3部分偏差(图3):实测值与实测多年平均值之差($y_i - \bar{y}$)、实测值与计算值之差($y_i - \hat{y}_i$)、计算值与实测多年平均值之差($\hat{y}_i - \bar{y}$)。

3部分偏差的平方和存在如下关系:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (1)$$

式中: $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ 为总离差平方和; $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$

为误差平方和; $\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 为回归平方和。

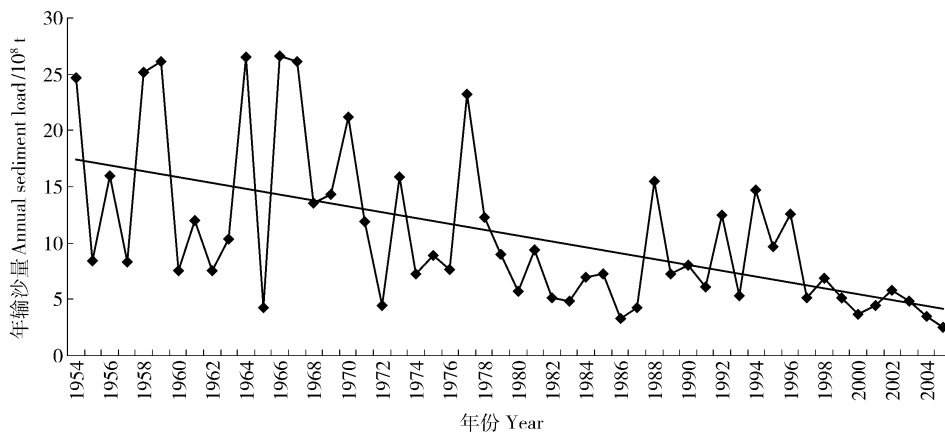


图2 1954—2005年4站区域黄河年输沙量变化图

Fig. 2 Change of sediment load from 1954 to 2005 in the area of four stations in the Yellow River

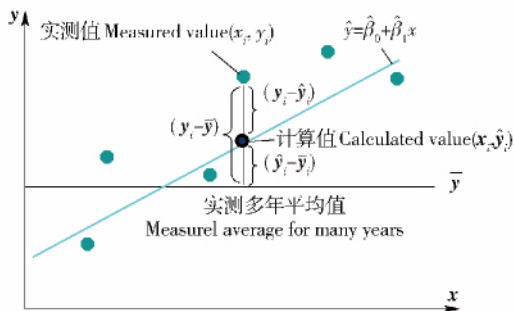


图 3 回归分析原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of regression analysis

回归平方和描述了计算值 $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ 的分散程度。

由于

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i,$$

且

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i;$$

因此, 计算值 $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ 的分散性源于自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的分散性, 并且是通过 x 对 y 的线性相关关系引起的。也就是回归平方和反映了线性计算值与它们的平均值的总偏差, 即由自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的变化引起计算值 $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ 的波动; 因此, 回归平方和反映了在 y 的总离差平方和中可以用 x 与 y 的直线关系解释的那部分变异。

基于以上原理, 判定系数 R^2 的定义为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

且 $0 < R^2 < 1$ 。

结合式(1)和式(2)可知, R^2 越大, 则意味着回归平方和在总离差平方和中占的比例越大, 相应的误差平方和在总离差平方和中占的比例越小, \hat{y} 对 y 的拟合程度越高, 即该回归计算结果的准确度越高。

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 即为该回归方程对年输沙量“解释”的比例。

2.3 影响因子初步选择与数据处理

1) 降雨因子选择与数据处理。由于黄河泥沙

主要源自河龙区间、源自汛期降雨(暴雨), 因此, 初步选取了 4 站区域年降雨量, 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。对于 4 站区域和河龙区间的时段降雨因子, 先以支流为单元, 对支流流域内的雨量站数据采用算术平均, 计算出该支流的年降雨量和 7—8 月降雨量, 再以支流面积加权计算出 4 站区域和河龙区间的年降雨量和 7—8 月降雨量; 对于暴雨因子, 由于是用于分析黄河年输沙量, 因此, 采用简化的计算方法, 根据各支流内各单站暴雨记录, 通过算术平均计算出支流暴雨降雨量, 再计算出区域暴雨。

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黄河年输沙量的变化, 进而准确地分析研究水土保持对黄河输沙量的影响, 将河龙区间划分为 5 个亚区^[8](图 4), 其中又将河龙区间的陕西北片和晋西北片合并为“河吴区间”片, 采用这些亚区 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”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 52 a 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。



图 4 河龙区间降雨分区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rainfall partitioning in the Hekouzhen-Longmen section

2) 水土保持因子选择与数据处理。水土流失治理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包括了淤地坝控制区域。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)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“水土保持综合治理面积”(图5)。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]。

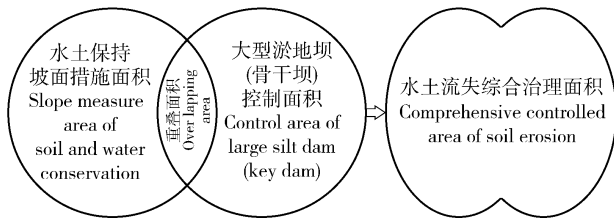


图5 水土流失综合治理面积示意图

Fig. 5 Schematic diagram for comprehensive controlled area of soil erosion

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 结果与分析

3.1 逐步回归计算过程描述与总体分析

采用逐步回归方法,经过3次计算,依次筛选出

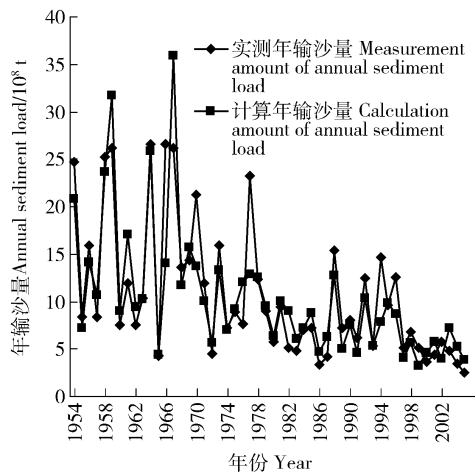
了由河口镇到吴堡区间7—8月降雨量(以下简称“河吴区间7—8月降雨量”)、水土流失治理度、经自然对数转换的河口镇到龙门区间年降雨量(以下简称“ln 河龙区间年降雨量”)3个因子组成的多元非线性回归方程,相关系数 R 达到 0.883,在 $\alpha = 0.001$ 的水平上高度显著;判定系数 R^2 达到 0.765,表明该回归方程可以“解释”1954—2005年4站区域黄河年输沙量76.5%的变化。

在逐步回归计算中,“河吴区间7—8月降雨量”在第1次计算中首先“入选”,该因子“解释”了1954—2005年4站区域年输沙量超过55%的变化;“水土流失治理度”在逐步回归计算的第2次计算中“入选”,其与“河吴区间7—8月降雨量”共同“解释”了研究时段内4站区域黄河年输沙量73.7%的变化,“ln 河龙区间年降雨量”最后“入选”,使回归方程的“解释”度达到76.5%。

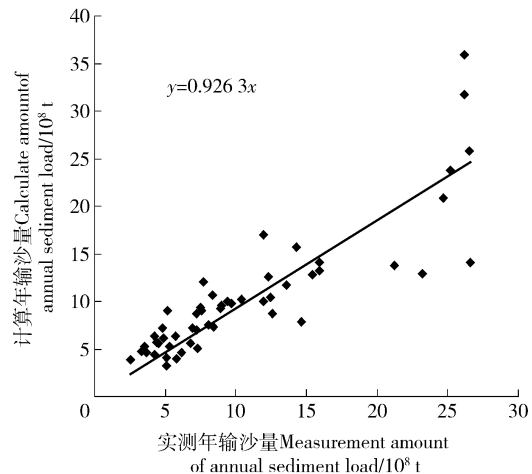
计算结果中筛选出的“河吴区间7—8月降雨量”和“ln 河龙区间年降雨量”2个涉及降雨的自变量,符合“黄河泥沙主要来自河龙区间,主要来自主汛期降雨和暴雨”的产沙基本规律^[11-12]。“水土流失治理度”自变量符合“水土保持是黄河泥沙治本措施”的基本原理。

3.2 回归方程的模拟效果分析

1954—2005年实测年输沙量与回归方程计算的年输沙量比较见图6。从图6(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4站区域年输沙量“低谷”波动的年际变化和持续递减的趋势,较好地反映了4站区域年输沙量在1980年以前剧烈波动



(a) 年度计算值与实测值比较 Comparison of calculated and measured yearly values



(b) 计算值与实测值散点图 Scatter plot of calculated and measured values

图6 计算值与实测值比较

Fig. 6 Comparison of calculated and measured values

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。

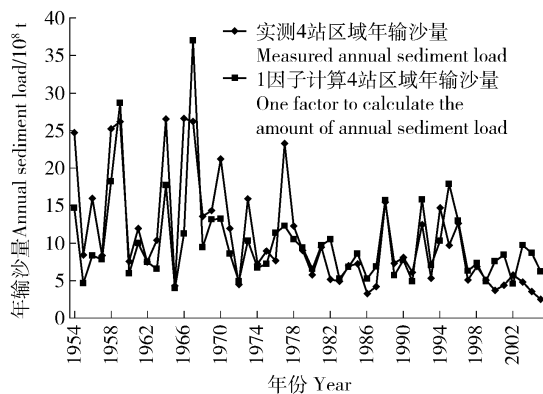
从 1954—2005 年实测年输沙量与计算年输沙量的散点图(图 6(b)) 可以看出, 数据点基本分布在 $Y=0.9263X$ 的直线附近, 说明计算量十分接近实测量。其中: 在年输沙量小于 20 亿 t 时, 计算值与实测值的偏差较小; 在年输沙量大于 20 亿 t 时, 计算值与实测值的偏差较大。其中偏差较大的 1966 和 1977 年^[13], 黄河流域均发生较大的局部暴雨, 冲毁了部分水土保持工程措施^[14-15], 造成多年拦淤减少的泥沙在当年被冲入黄河, 使回归方程不能够“解释”这些输沙量。

3.3 逐步回归第 1、2 次计算结果分析

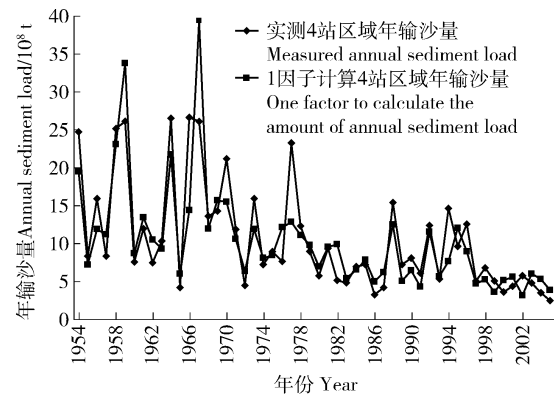
为了研究水土流失治理度对 4 站区域年输沙量的影响, 将第 1 次逐步回归结果的计算值与实测值

进行比较(图 7(a))。可以看出, 仅以“河吴区间 7—8 月降雨量”1 个因子虽然总体上可以粗略地刻画出输沙量年际变化, 但是不能很好地“解释”20 世纪 80 年代以后年输沙量递减的趋势, 特别是在 20 世纪 90 年代后期以后, 计算年输沙量明显大于实测年输沙量。

再将第 2 次逐步回归结果的计算值与实测值进行比较(图 7(b))。可以看出, 由河吴区间 7—8 月降雨量和水土流失治理度 2 个因子构建的回归方程不仅与 3 因子回归的计算结果相近, 而且可以很好地模拟近期年输沙量锐减的趋势, 在总体上更接近实测值。通过对比图 7(a) 和 (b), 可以在二维图形中直观地看出水土保持对黄河年输沙量的影响十分显著, 是 20 世纪 80 年代以来造成黄河输沙量锐减的主要因素。



(a) 1 自变量因子回归计算值与实测值比较 Comparison of calculated values of one independent variable regression with measured values



(b) 2 自变量因子回归计算值与实测值比较 Comparison of calculated values of two independent variable regression with measured values

图 7 不同自变量计算结果比较

Fig. 7 Comparison of the results of different independent variables

3.4 水土保持对 4 站区域黄河年输沙量影响的三维曲面图形分析

做出回归方程的曲面图形可以从三维空间进一步直观地观察和分析水土流失治理度对 4 站区域黄河年输沙量的影响。由于计算结果包括 3 个自变量和 1 个因变量, 为了做出三维图形, 将影响较小的河龙区间年降雨量固定, 取其最大观测值, 以河吴区间 7—8 月降雨量和水土流失治理度作为自变量, 做出从不同方向观察的三维曲面图形(图 8(a)、(b))。

首先, 从图 8(a) 可以看出, 随着河吴区间 7—8 月降雨量的降低与水土流失治理度的增加, 曲面急剧下降, 从总体上说明在研究时间区段, 当水土流失治理度从接近 0 开始, 持续增加到接近 50% 时, 伴随着河吴区间 7—8 月降雨量的变化, 年输沙量从超过 40 亿 t 急剧减少到 5 亿 t 以下, 水土流失治理度

对年输沙量下降产生了十分显著的影响。

其次, 将水土流失治理度坐标旋转到左边(图 8(b)), 从回归曲面的“正面”进行分析。从 A 边可以看出, 当水土流失治理度为 0 时, 随着河吴区间 7—8 月降雨量的增加, 4 站区域计算年输沙量从 10 亿 t/a 左右急剧增加到 40 亿 t/a 以上(1933 年实测黄河年输沙量超过 39 亿 t)。而在水土流失治理度达到 50% 左右时(图 8(b) 中的 D 边), 随着河吴区间 7—8 月降雨量的增加, 输沙量从不到 5 亿 t/a 仅递增至约 18 亿 t/a 左右。

第三, 做出从水土流失治理度“侧面”观察的二维图形(图 9) 做进一步的分析。由图 9(a) 可以看出, 河吴区间 7—8 月降雨量分别为最大观测值(图的上边沿) 和最小观测值(图的下边沿) 时, 计算年输沙量的变化趋势不同。在河吴区间 7—8 月降雨量

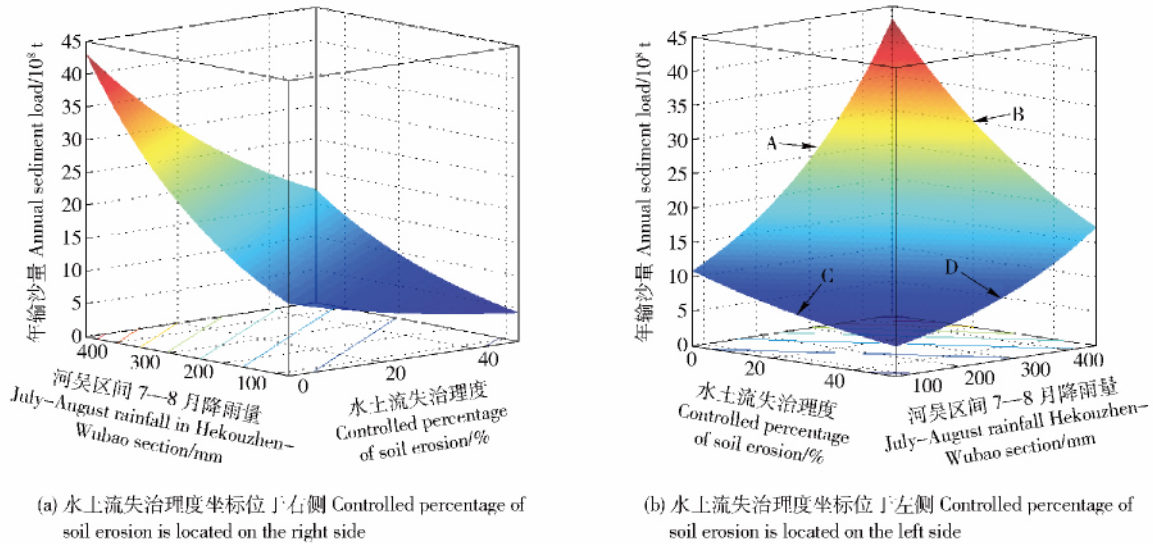


图8 回归方程三维曲面图形

Fig.8 Three-dimensional surface graphics of regression equation

为最大值时,图的上边沿较陡峻,表明随着水土流失治理度的提高, A 站区域黄河年输沙量急速降低,在该治理度区段(0~50%),计算年输沙量下降幅度超过 20 亿 t;当水土流失治理度增加到 45% 以上时,尽管河吴区间 7—8 月降雨量为最大观测值,但年输沙量将不到 20 亿 t/a。在河吴区间 7—8 月降雨量较低时,水土流失治理度的增加对黄河年输沙量的影响幅度逐渐降低,当河吴区间 7—8 月降雨量为最小观测值时,图下边沿较平缓,随着治理度的增加,黄河年输沙量从超过 10 亿 t/a 下降到 4 亿 t/a

左右,下降幅度仅约 5 亿 t,远小于河吴区间 7—8 月降雨量为最大观测值时水土流失治理度对黄河年输沙量的影响幅度。

提取图 9(a) 的上边沿曲线和下边沿曲线,对曲线方程求导,计算其斜率,并做出二维图形(图 9(b))。可以看出,在相同水土流失治理度时,上边沿曲线的斜率大于下边沿曲线的斜率。其中在水土流失治理度为 25% 时,上边沿曲线的斜率为 -0.501 1,而下边沿曲线的斜率仅为 -0.127 4。这一现象说明,降雨量越大,水土流失治理度的提高使

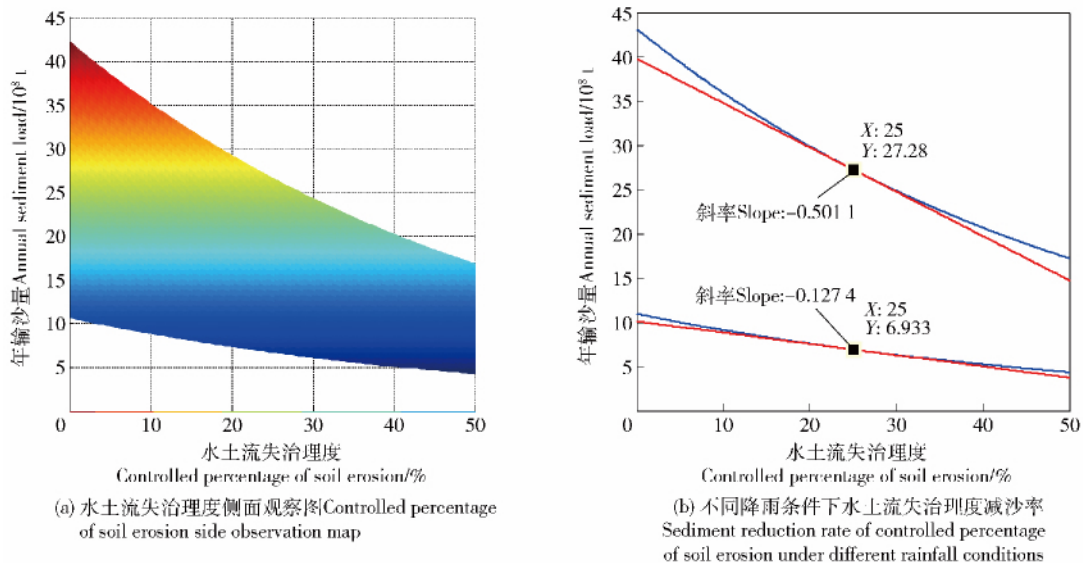


图9 河龙区间年降雨量为最大观测值、河吴区间7—8月降雨量为最大(最小)观测值时水土流失治理度对黄河年输沙量的影响

Fig.9 Impact of controlled percentage of soil erosion on the annual sediment load in the Yellow River when the July-August rainfall of the Hekouzhen-Wubao section was at the maximum (minimum) and when the annual rainfall of the Hekouzhen-Longmen section is at the maximum value

黄河年输沙量减少率越大,水土保持的减沙效益越显著。

通过对图9的分析,说明在降雨量较大时水土保持对黄河年输沙量的影响明显大于降雨量较小的情况。随着水土流失治理度的提高,水土保持不仅减少了降雨产沙(输沙)的数量,而且改变了降雨产沙(输沙)的变化趋势,实现了黄河年输沙量的持续波动减少。

4 结论与讨论

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,筛选出的由“河吴区间7—8月降雨量”“水土流失治理度”“ln‘河龙区间年降雨量’”等3个因子组成的回归方程可以较好地“解释”1954—2005年黄河年输沙量的年际波动变化和长期递减变化趋势,说明拟定的技术方法可行,确定的解释变量合理,采用的计算数据客观。

2) 水土流失治理度较好地“解释”了20世纪80年代以来黄河年输沙量锐减的现象,说明水土保持是黄河年输沙量减少的主要因素。

3) 在计算时段内,相同水土流失治理度条件下,河吴区间7—8月降雨量越大,水土流失治理度对黄河年输沙量的减沙率越大。

4) 在水土流失治理度达到50%左右时,即使河吴区间7—8月降雨量和河龙区间年降雨量同时为最大观测值,黄河年输沙量仍仅18亿t/a左右,明显小于历史年输沙量的极值,说明水土保持明显影响了黄河年输沙量的变化趋势。

5 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: 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: 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: 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: 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: 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] 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: 124-129
- [12] 赵文林. 黄河泥沙[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996: 48
- [13] 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: 54-55
- [14] 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: 284-287
- [15] 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

(责任编辑: 宋如华)