

文章编号: 0468-155X(2016)03-0001-08

黄河河龙区间年输沙量对水土保持的响应机理研究

李敏¹ 穆兴民²

(1. 水利部黄河水利委员会黄河上中游管理局, 陕西西安 710021; 2. 中国科学院-水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 采用多元逐步回归分析方法, 分析研究 1954-2013 年河龙区间年输沙量对水土保持的响应机理。结果表明, 不同时段计算得出的年输沙量响应回归方程相关系数均达到 α 为 0.001 的高显著性水平。随水土保持治理度的提高, 河龙区间年输沙量对水土保持治理度的响应敏感性增加, 显著程度提高; 水土保持治理对减少高降雨产沙的效果明显; 随着水土保持治理度的提高, 河龙区间年输沙量对相同降雨条件响应的敏感程度减弱。

关键词: 黄河; 河龙区间; 年输沙量; 水土保持; 响应

中图分类号: TV141.3; S157.1

文献标识码: A

DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2016.03.001

以往对黄河泥沙变化的研究多采用水文法与水保法, 存在明显的理论和技术困难。本文探索采用统计分析方法, 分析长系列黄河河龙区间年输沙量对水土保持的响应机理, 以为建立黄河流域水土保持数学模型提供技术基础^[1-5]。

1 观测数据与方法

1.1 研究的区域、时间区段和年输沙量变化简述

研究的区域为黄河泥沙主要来源的河口镇到龙门区间(以下简称“河龙区间”)。研究的时间段为 1954-2013 年共 60 年, 包括了 20 世纪 70 年代以前的年输沙量大且剧烈波动的时段和 70 年代以后的年输沙量锐减时段, 以及 90 年代以后年输沙量长期处于低位时段(图 1)。

河龙区间年输沙量在研究时段内主要存在两个方面的变化: 一是年际间的波动变化。其中 1964 年输沙量大于 14 亿 t, 相邻的 1965 年却不到 2 亿 t, 而且 1966 年又激增到 15 亿 t 以上。二是长期递减变化。年输沙量从 1954 年的 18 亿 t 以上波动递减到 2013 年的仅 1.3 亿 t, 而最低的 2011 年不到 0.1 亿 t, 绝对变化量超过 16 亿 t^[6-7]。

对于年输沙量的变化, 一般认为, 在 1970 年代以前虽然已经开展了水土流失的治理, 但是规模较小, 属于对降雨因子响应状态; 1970 年代以后年输沙量逐渐波动递减, 属于对人类活动(主要是水土保

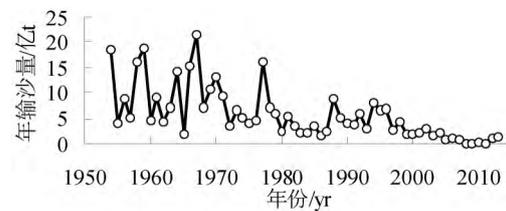


图 1 1954-2013 年河龙区间实测年输沙量
Fig. 1 Measured annual sediment discharge on Helong region from 1954-2013

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-04-03); 国家自然科学基金项目(41271295, 41371277)

作者简介: 李敏(1952-), 男, 江苏徐州人, 教授级高工, 主要从事水土保持数学模型研究。E-mail: limin173@sina.com

通讯作者: 穆兴民。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

持治理) 响应状态,也就是年输沙量对水土保持治理非线性响应显著的时期;进入 20 世纪末以后,年输沙量持续处于 5 亿 t 以下的低水平。

1.2 分析计算方法

根据水文学和水土保持学基本原理,年输沙量对降雨和水土保持治理的响应遵循统计学规律。理论和实践表明,年输沙量对降雨和水土保持等因子之间的响应表现为非线性相关关系。

受各种因素的影响,在宏观层面,这种关系可能十分复杂,为了符合降雨产沙和水土保持减沙的基本原理,将河龙区间泥沙的产生过程视为一个灰箱或者黑箱,划分年输沙量对水土保持响应的不显著时期、显著时期和持续响应时期,采用逐步回归分析方法,对实测数据进行计算处理,筛选具有物理成因概念和含义的因子(自变量),获得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,分析和研究河龙区间年输沙量对水土保持治理的响应机理^[8-9]。

本文共划分了三个时段:1954-1966 年,该时段水土保持治理程度低,年输沙量持续处于高位,年输沙量对水土保持治理响应不显著;1967-1987 年,该时段水土保持由分散向大规模集中连片治理,年输沙量骤降;1988-2013 年,水土保持治理工程持续处于高强度、大规模实施阶段,年输沙量长期处于低位,该时段年输沙量对水土保持持续积极响应。

2 影响因子初步选择与数据处理

2.1 降雨因子

为了精细地仿真模拟年输沙量的变化,以分析河龙区间年输沙量对水土保持的响应特性,除了选择河龙区间年降雨量、7-8 月降雨量、最大 3 日降雨量和最大 1 日降雨量等全区域的降雨因子外,还根据河龙区间暴雨和泥沙的来源与组成,进一步将河龙区间进行分区(图 2)。首先以吴堡为界,将河龙区间划分为 2 个降雨亚区,分别是河口镇到吴堡区间(以下简称“河吴区间”)和吴堡到龙门区间(以下简称“吴龙区间”);其次将“河吴区间”又划分为“陕西北片”和“晋西北片”;将“吴龙区间”划分为“无定河片”、“陕西南片”与“晋西南片”,共 5 个三级区^[10]。采用河吴区间和 5 个三级区 7-8 月降雨量、最大 3 日降雨量和最大 1 日降雨量等作为表达河龙区间年输沙量的候选自变量。以上共初步选择 22 个降雨因子。考虑到 60 年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 44 个。



图 2 研究区域和亚区划分示意

Fig.2 Study area and sub region division

对于时段降雨因子,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,由于是用于分析河龙区间年输沙量,因此,采用简化的计算方法,根据各支流内各单站暴雨记录,用算术平均计算出支流暴雨降雨量,再计算出区域暴雨量。

2.2 水土保持因子

水土保持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)控制面积加以“耦合”与综合处理(图 3)。根据典型(抽样)调查核对,去除水土保持治理措

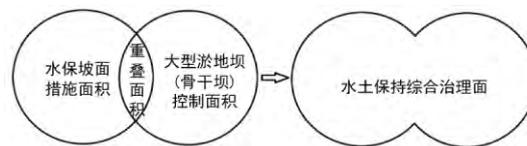


图 3 水土保持综合治理面积示意

Fig.3 Diagram of comprehensive management area of soil and water conservation

施统计数据中人为增加的“水分”和自然造成的损耗 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”。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^[11-12]。

为了使不同时间和空间尺度的计算结果具有可比性,将“水土保持治理度”作为基本变量。水土保持治理度的定义为

$$D = \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中 D 为水土保持治理度,%; A_1 为水土保持综合治理面积,万 km^2 ; A_2 为水土流失面积,万 km^2 。

2.3 逐步回归计算设定与计算过程描述

在逐步回归计算中,首先设定回归方程中自变量进入和剔除的显著性水平,然后对全部备选降雨和水土保持因子进行逐步回归筛选计算。对于自变量的筛选,采用 F 检验的概率值作为判据。在逐步回归计算时,当一个变量的 Sig 值 \leq 设定的 0.05 时,该变量被引入回归方程;当一个变量的 Sig 值 \geq 设定的 0.1 时,该变量被剔除出回归方程。对于逐步回归计算的结果再进行水文学和水土保持学研判。当出现不符合水文学和水土保持学基本概念的情况,进行人工干预,剔除不合理的因子,继续进行逐步回归计算。直至形成符合水文学和水土保持学基本概念、结构合理的计算结果。

3 三个时段计算结果与分析

3.1 1954-1966 年年输沙量对水土保持响应特点

1954-1966 年期间,河龙区间年输沙量较大,且年际间的波动剧烈(图4)。简单统计分析显示,拟合的趋势线相关系数很小($R^2 = 0.0165$),说明该时段年输沙量没有统计学意义上的趋势变化。

该时段虽然已经开展了水土流失的治理,但规模较小,质量不高。截止1966年,水土保持治理度仅6%,建设的大型淤地坝200余座。相反,这一时段毁林开荒,毁林炼钢等大规模开展,人为水土流失严重。已有的研究表明,河龙区间年输沙量在这一时段属于人为减沙影响不明显的时期。

逐步回归分析计算结果表明,1954-1966年时段,年输沙量对水土保持治理度没有响应,回归方程仅与“ $\ln(\text{河吴区间7-8月降雨量})$ ”有很好的相关性,其回归方程为

$$z = e^{(-5.23607 + 1.37404x)} \quad (2)$$

式中 z 为河龙区间年输沙量,亿 t; x 为 $\ln(\text{河吴区间7-8月降雨量})$ 。

将(2)式的计算值与实测值比较看出(图5),采用回归方程(2)式计算年输沙量与实测年输沙量拟合较好,计算年输沙量(y)为实测年输沙量(x)的0.9426倍,说明该时段对数形式的河吴区间7-8月降雨量是影响年输沙量的主要因子。

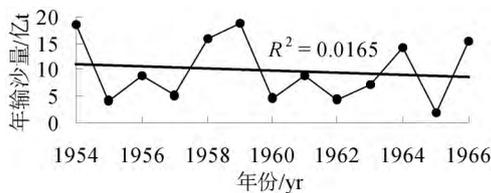


图4 1954-1966年河龙区间年输沙量变化分析

Fig. 4 Variation of annual sediment discharge in Helong region in 1954-1966

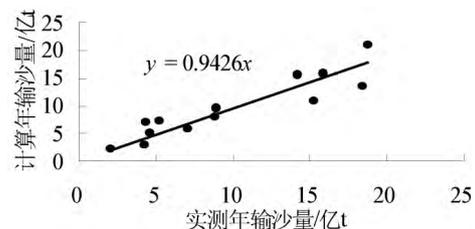


图5 1954-1966年实测年输沙量与计算年输沙量比较

Fig. 5 Comparison of annual sediment discharges between observation and calculation in 1954-1966

3.2 1967-1987 年输沙量对水土保持治理响应特点

3.2.1 年输沙量变化过程描述

1967-1987年河龙区间年输沙量波动递减(图6)。简单统计分析结果表明,拟合的年输沙量变化

趋势线相关系数($R^2 = 0.4464$) 在 $\alpha = 0.01$ 的水平上具有显著性,说明这一时段年输沙量减少的趋势具有统计学意义。在持续下降的过程中,在 1977 年出现了一个年输沙量超过 15 亿 t 的峰值。

1967 - 1987 年时段是黄河流域水土保持由群众运动式的分散治理进入规模治理的新常态、并持续发展的时期。1980 年 5 月,国务院批准黄河中游水土保持委员会重新恢复建制,组织协调黄河中游地区的水土保持工作。1981 年开始统计上报开展治理面积突破 1 万 km^2 。落实的水土保持治理度从 1967 年的不到 7% 提高到 1987 年的超过 30%。河龙区间年输沙量在这一时段的发生质变。

3.2.2 逐步回归计算过程描述与总体分析

对 1967 - 1987 年数据采用逐步回归和手工试算方法,通过三次计算,先后筛选出由河口镇至吴堡(河吴区间)7 - 8 月降雨量、水土保持治理度、河龙区间最大一日降雨量等 3 个自变量组成的年输沙量响应回归方程,其相关系数为 0.9653,显著性水平 $\alpha = 0.001$ 。

筛选出的“河吴区间 7 - 8 月降雨量”和“河龙区间最大一日降雨量”两个涉及降雨的自变量,均为正值,符合“黄河泥沙主要来自汛期降雨和暴雨”的产沙基本规律^[13-14];筛选出的“水土保持治理度”自变量为负值,符合“水土保持是黄河泥沙治本措施”的基本原理。

逐步回归第三次计算得出的年输沙量响应多元非线性回归方程为

$$z = e^{(0.016597 + 0.003971x_1 + 0.031415x_2 - 0.04399x_3)} \quad (3)$$

式中 z 为河龙区间年输沙量,亿 t; x_1 为河吴区间

7 - 8 月降雨量, mm; x_2 为河龙区间最大一日降雨量, mm; x_3 为河龙区间水土保持治理度, %。

采用(3)式计算年输沙量与实测年输沙量比较见图 7。从图 7 看出,计算年输沙量与实测年输沙量拟合很好,计算年输沙量(y)为实测年输沙量的 1.0058 倍。

3.2.3 年输沙量对水土保持响应的总体特点分析

逐步回归计算出的回归方程包括三个因子,因为是经过三次计算,所以根据预先设定的计算规则,各因子进入回归方程的先后顺序不同,因而各因子对年输沙量的影响也不同,相应地,年输沙量对三个自变量因子的响应特点也不同。

首先从各次计算结果的相关性分析(表 1),第 1 次计算,筛选出“河吴区间 7 - 8 月降雨量”,该因子与年输沙量的相关系数为 0.8234,说明河龙区间年输沙量在本时段对这一自变量的变化响应敏感。第 2 次计算增加了“水保治理度”因子,由“河吴区间 7 - 8 月降雨量”和“水土保持治理度”两个因子组成的回归方程相关系数提高到 0.9118。第 3 次计算增加了河龙区间最大一日降雨量因子后,回归方程的相关系数增加到 0.9653。

其次将各自变量的回归系数进行标准化,去除各自变量因不同的量纲对回归系数大小的影响,使不同的自变量系数大小具有相对可比性(表 2)。从表 2 看出,在逐步回归第 2 次计算时,水土保持治理度的标准化回归系数为 -0.4637,该绝对值略小于河吴区间 7 - 8 月降雨量的 0.5752,说明在第 2 次逐步回归计算形成的回归方程中,年输沙量对河吴区间 7 - 8 月降雨量的响应显著性略大于水土保持治理度因子。在逐步回归的第 3 次计算结果中,增加了河龙区间最大一日降雨量因子,水土保持治理度的标准

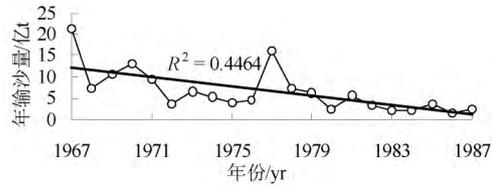


图 6 1967 - 1987 年河龙区间年输沙量变化分析
Fig. 6 Variation of annual sediment discharges in Helong reach in 1967 - 1987

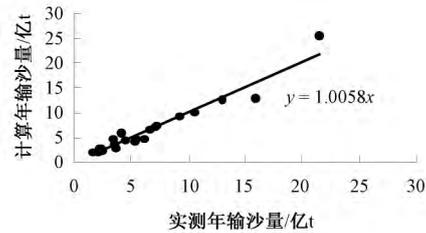


图 7 1967 - 1987 年实测年输沙量与计算年输沙量比较
Fig. 7 Comparison of annual sediment discharges between observation and calculation in 1967 - 1987

表 1 1967 - 1987 年逐步回归计算结果
Table 1 Results of stepwise regression analysis in 1967 - 1987

计算次数	R	R ²	调整 R ²	标准误差
1	0.8234	0.6779	0.6610	0.4074
2	0.9118	0.8313	0.8126	0.3029
3	0.9653	0.9319	0.9198	0.1981

化回归系数的绝对值增加到 0.4707,成为对年输沙量影响最大的因子。因此,从标准化回归系数分析结果,在 1967-1987 年时段,年输沙量对水土保持治理度的响应强度明显大于单个降雨因子。

3.2.4 年输沙量对不同水土保持治理度响应的对比分析

由于是非线性关系,河龙区间的年输沙量对不同水土保持治理度的响应程度不同,响应的过程(趋势)也不同。根据回归方程做出在相同降雨条件下不同水土保持治理度不同视角的三维曲面图形,对比分析年输沙量在不同水土保持治理度时的响应程度和响应趋势。以下选择 1977 年(水土保持治理度 18.8%)和 1987 年(水土保持治理度 30.3%)的年输沙量对水土保持治理度变化响应的曲面进行比较分析(图 8)。

表 2 1967-1987 年回归方程系数
Table 2 Coefficients of regression equations in 1967-1987

计算次数	自变量	非标准化回归系数		标准化回归系数	t	Sig.
		系数	标准误差			
1	常量	-0.0448	0.2810		-0.1595	0.8749
	河吴区间 7-8 月降雨量	0.0077	0.0012	0.8234	6.3238	0
	常量	1.2696	0.3863		3.2868	0.0041
2	河吴区间 7-8 月降雨量	0.0054	0.0011	0.5752	5.0183	0.0001
	水土保持治理度	-0.0433	0.0107	-0.4637	-4.0455	0.0008
	常量	0.0163	0.3556		0.0458	0.9640
3	河吴区间 7-8 月降雨量	0.0040	0.0008	0.4226	5.2228	0.0001
	水土保持治理度	-0.0440	0.0070	-0.4707	-6.2788	0
	河龙区间最大一日降雨量	0.0314	0.0063	0.3503	5.0084	0.0001

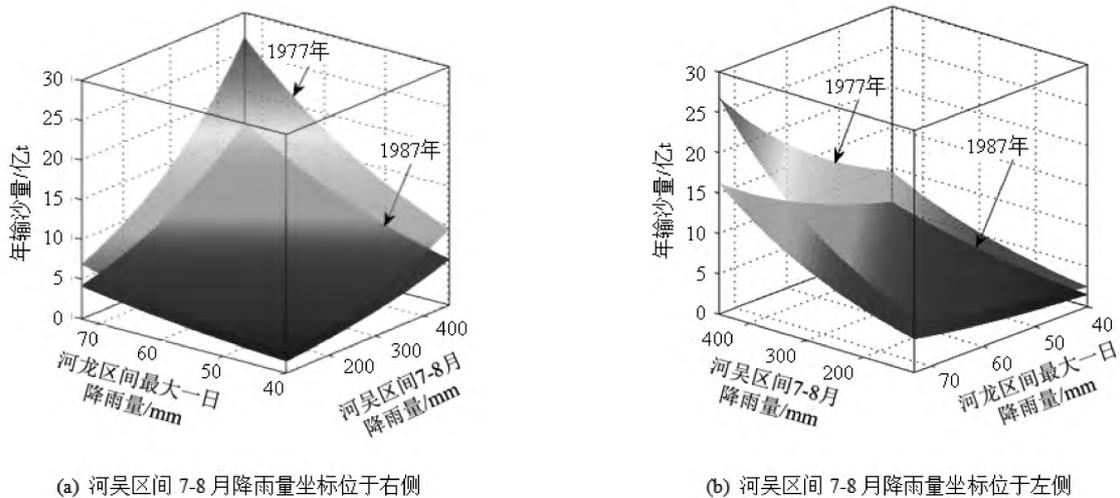


图 8 年输沙量对不同水土保持治理度的响应曲面

Fig. 8 Response surface of annual sediment discharge by different soil and water conservation management

(1) 水土保持治理度降低年输沙量对降雨响应的绝对量

从图 8 总体上看出,年输沙量对不同水土保持治理度的响应曲面高低不同。在曲面的最高点,即两个降雨因子均处于最大值时,1987 年输沙量响应曲面比 1977 年输沙量响应曲面降低大于 10 亿 t;在曲面的最低点,即两个降雨因子均处于最小值时,两个年输沙量响应曲面相差幅度不到 2 亿 t。对比分析看出,随着水土保持治理度的增加,一方面,总体上年输沙量显著减少,另一方面,年输沙量响应曲面在高降雨条件下的减少幅度大于低降雨条件。说明在相同降雨条件下,随水土保持治理度的增加,河龙区间年输沙量显著减少,而且水土保持治理在减少高降雨产生的水土流失效果大于低降雨条件。

(2) 水土保持治理降低了年输沙量对降雨响应的敏感度

比较图 8 中 1977 年和 1987 年两个年份的输沙量响应曲面可以看出,1977 年水保治理水平年输沙量响应曲面曲率较大,其随降雨的变化而急剧变化,计算的年输沙量最高与最低值相差约 25 亿 t;1987 年水保治理水平年输沙量响应曲面不仅较低,而且曲率较小,显著平缓,计算的年输沙量最高与最低值相差约 15 亿 t。这一现象说明水土保持治理不仅大幅度减少了河龙区间黄河年输沙量,而且使年输沙量对降雨变化响应的敏感度降低。

(3) 水土保持治理降低年输沙量对降雨响应的敏感度的数学分析

对曲面某一点求导,计算该点的斜率,进一步分析在相同降雨条件下,年输沙量对不同水土保持治理度的响应特点。由于固定了水土保持治理度,因此回归方程就成为年输沙量(z)与两个降雨因子(x, y)的二元回归方程。

1977年是分析时段中第二大输沙量年份。该年河吴区间7-8月降雨量和河龙区间最大一日降雨量均为研究系列中的较大值。选取1977年降雨数据,求出回归方程在该点的偏导数(式(4)和式(5)),并做出年输沙量响应曲面在该点的切面,将三维曲面旋转到便于观察的方向,直观地分析两个曲面切面的特性(图9)。

$$\frac{\partial z}{\partial x} = f'_x(x, y) \tag{4}$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = f'_y(x, y) \tag{5}$$

式中 z 为年输沙量,亿t; x 为7-8月降雨量,mm; y 为最大一日降雨量,mm。

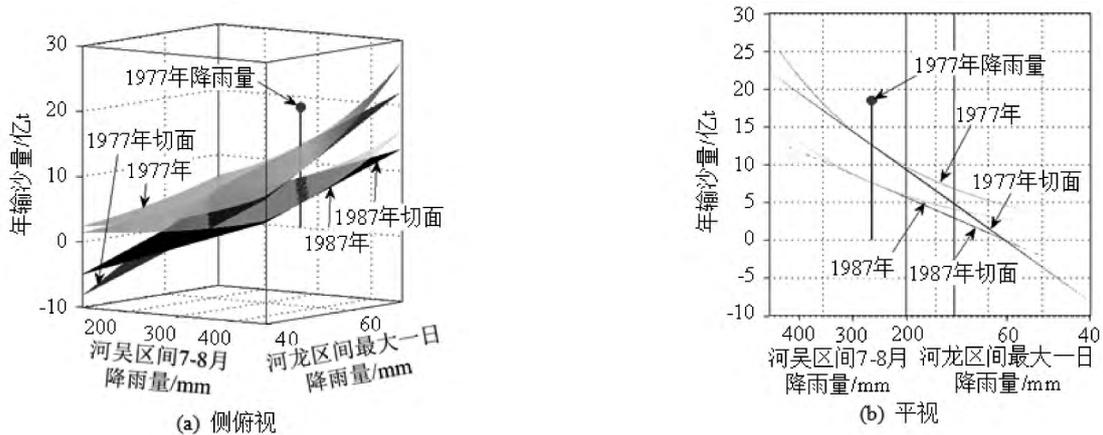


图9 两个输沙量响应曲面在1977年降雨条件点的切面

Fig. 9 Tangent plane of two sediment discharge response surfaces at rainfall condition in 1977

从图9看出,同为1977年降雨条件,在1977年水土保持治理度时,该切面相对陡峭;随着水土保持治理度的增加,1987年曲面的斜率减小,该切面相对平缓。

以上分析说明,随着水土保持治理度的增加,河龙区间年输沙量对相同降雨条件的响应程度大幅度降低,响应的敏感性减弱,表明水土保持治理对减少高降雨产沙的效果明显。

3.3 1988-2013年年输沙量对水土保持治理的响应特点

1988-2013年时段是年输沙量对水土保持治理度持续响应的时段(图10)。总体上,这一时段年输沙量均在10亿t以下,其中2000-2013年平均年输沙量仅1.17亿t,是《2013年黄河泥沙公报》公布的河龙区间多年均值6.16亿t的19%。对河龙区间年降雨量分析表明,该时段河龙区间年降雨量有一定的增加趋势(图11),在2013年出现时段最大值。

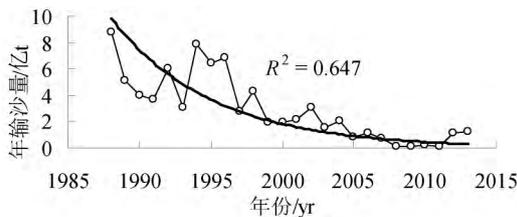


图10 1988-2013年河龙区间年输沙量变化
Fig. 10 Variation of annual sediment discharge in Helong reach in 1988-2013

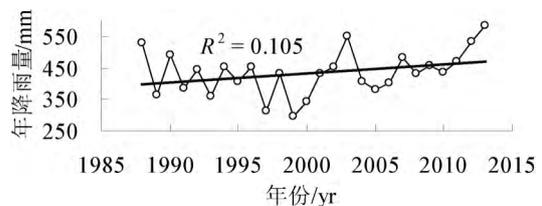


图11 1988-2013年河龙区间年降雨量变化
Fig. 11 Variation of annual rainfall on Helong reach in 1988-2013

河龙区间年输沙量在这一时段属于人为减沙持续显著影响时期。这一时段除了继续实施国家四大重点治理工程外,骨干工程项目由单坝建设转入以小流域为单元的坝系建设阶段,还先后开展了沙棘治理砒砂岩项目、黄土高原水土保持世界银行贷款项目等治理水土流失工程。到2013年水土保持治理度超过60%。分析这一时段年输沙量变化,得出回归方程

$$z = 14.5215 - 10.8534 \times \ln(x_1) + 4.9113 \times \ln(x_2) \quad (6)$$

式中 z 为河龙区间年输沙量,亿 t; x_1 为水土保持治理度,%; x_2 为河龙区间年降雨量,mm。回归方程的相关系数为 0.9653,显著性水平 $\alpha = 0.001$ 。回归方程中的水保因子为负值,降雨因子为正值。

采用回归方程(6)式计算年输沙量与实测年输沙量比较见图12。从图中看出,总体拟合效果较好,计算值是实测值的0.9092。

在该时段的逐步回归计算中,水保因子首先进入回归方程,仅“ln(水土保持治理度)”一个因子形成的回归方程相关系数就高达0.8285(表3);第2次计算,“ln(河龙区间年降雨量)”进入回归方程,使回归方程的相关系数增加到0.8829,调整的 $R^2 = 0.7603$ 。从标准化回归系数分析(表4),该时段水土保持对年输沙量影响显著,几乎是降雨因子影响力的3倍。

该时段回归方程(5)式的三维图(图13)看出,年输沙量受水土保持治理度影响变化强烈(图13(a)),反映年输沙量变化曲面的等高线也基本是随水土保持治理度的增减而变化(图13(b))。其中,2013年河龙区间年降雨量接近600mm,是时段平均年降雨量(434mm)的135%,然而,该年的计算年输沙量仅0.76亿t。

综合以上分析,本时段水土保持治理度成为影响年输沙量的主要因子,年输沙量对水土保持治理度响应极为显著。

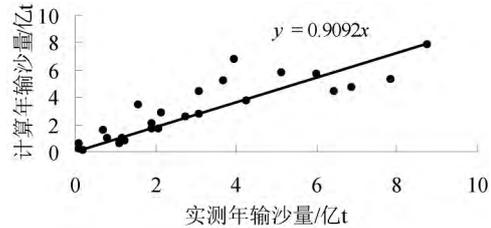


图12 1988-2013年实测年输沙量与计算年输沙量比较

Fig. 12 Comparison of annual sediment discharges between measurement and calculation in 1988-2013

表3 1988-2013年逐步回归计算结果
Table 3 Results of stepwise regression analysis in 1988-2013

计算次数	R	R^2	调整 R^2	标准误差
1	0.8285	0.6864	0.6734	1.4427
2	0.8829	0.7795	0.7603	1.2358

表4 1988-2013年回归方程系数

Table 4 Coefficients of regression equations in 1988-2013

计算次数	自变量	非标准化回归系数		标准化回归系数	t	Sig.
		系数	标准误差			
1	常量	39.7956	5.0893		7.8195	0
	ln(水土保持治理度)	-9.6735	1.3346	-0.8285	-7.2482	0
2	常量	14.5215	9.2080		1.5771	0.1284
	ln(水土保持治理度)	-10.8534	1.2043	-0.9296	-9.0124	0
	ln(河龙区间年降雨量)	4.9113	1.5761	0.3214	3.1161	0.0049

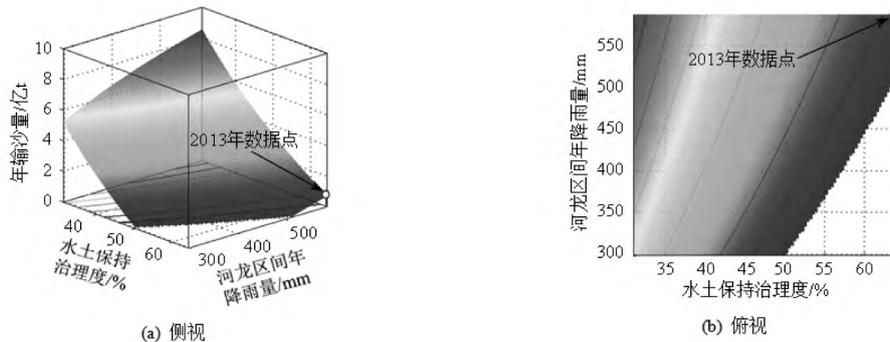


图13 1988-2013年年输沙量对水土保持治理度的响应曲面

Fig. 13 Response surface of annual sediment discharges to soil and water conservation management in 1988-2013

4 结论

(1) 分三个时段对河龙区间 60 年年输沙量、降雨和水土保持数据的统计分析结果表明,不同时段年输沙量对水土保持治理度响应的敏感度和显著程度不同。总体上,随着水土保持治理度的增加,年输沙量对水土保持治理度响应的敏感度增加,显著程度提高。

(2) 计算结果表明,在高降雨条件下水土保持治理度的减沙效果大于低降雨条件。

(3) 随着水土保持治理度的提高,河龙区间年输沙量对相同降雨条件响应的敏感程度减弱。

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] 陈先德. 黄河水文[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996: 80-88.
- [7] 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.
- [8] 李敏, 王富贵. 经济社会发展对黄河中游输沙量影响分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(3): 12-16+20.
- [9] 李敏. 水土保持对黄河输沙量的影响[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 23-29.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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, 35(4): 37-40.
- [13] 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.
- [14] 赵文林. 黄河泥沙[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996: 48.

Study on response mechanism of annual sediment transport to soil and water conservation in He-Long reach of the Yellow River

LI Min¹, MU Xing-min²

(1. Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xian 710021, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Multivariate stepwise regression analysis method is adopted to study He-Long reach sediment response mechanism of soil and water conservation from 1954 to 2013. Results show that: 1) The correlation coefficient of regression equation of sediment transport response in calculation of all different periods reached high significant at $\alpha = 0.001$ level. With the increase of the degree of soil and water conservation governance, the sensitivity of annual sediment discharge in response in He-Long reach was increased for the degree of soil and water conservation governance, and increased significantly. 2) The effect of soil and water conservation treatment on reducing high rainfall sediment yield was obvious. 3) With the increase of the degree of soil and water conservation governance, the sensitivity of annual sediment discharge to the same rainfall condition was decreased in the He-Long reach.

Key words: Yellow River; He-long reach; annual sediment yield; soil and water conservation; response

(责任编辑: 陈绪坚、刘 峡)