

黄河河龙区间年输沙量的仿真模拟

李 敏 王富贵

(黄河上中游管理局, 陕西 西安 710021)

摘要: 准确地模拟黄河输沙量的变化过程, 将为研究黄河泥沙变化的原因和建立黄河泥沙预测模型提供必要的技术基础。黄河泥沙主要来源于河口镇至龙门区间, 为精细模拟该区间输沙量的变化, 进一步划分了亚区, 选择了 23 个降雨因子和一个水土保持治理因子, 采用回归分析方法, 筛选出河口镇至吴堡区间 7—8 月降雨量、水土保持治理度、陕西北最大三日降雨量等 3 个解释因子。利用这 3 个因子解释和仿真模拟了 1954—2005 年河龙区间年输沙量的年际波动变化与长期递减变化 77% 以上的变化过程, 相关系数为 0.886, 显著性水平达到 0.01。说明拟定的技术路线可行, 确定的解释变量合理, 采用的计算数据客观。

关键词: 河龙区间; 输沙量; 仿真模拟; 黄河

Simulation of The Annual Sediment Discharge in Helong Interval of the Yellow River

Li Min, Wang Fugui

(Administration of the Upper and Middle Reaches of the Yellow
River, Xi' an, 710021)

Abstract: Accurate simulation of the process of change for the Yellow River sediment discharge, will provide the necessary technical foundation to study the reasons for the change of the Yellow River sediment and establishment sediment prediction model of the Yellow River. Yellow River sediment comes mainly from the Hekouzhen to the Longmen Section. For fine simulation of sediment discharge changes, further divided into sub-regions, selected 23 rainfall factors and a soil and water conservation factor, using regression analysis method, filtering out three factors, they are “the Hekouzhen to the Wubao interval July–August rainfall”, “improvement degree of soil and water conservation” and “North Shaanxi maximum three-day rainfall”. these three factors interpretate and simulate more than 77% of the variation in the process of interannual fluctuations change and long-term decreasing of annual sediment discharge from 1954 to 2005 in the Helong interval, the correlation coefficient is 0.886, significant levels reached 0.01. The result shows that the technical course is feasible, the explanatory variables are reasonable, the calculation data are objective.

Keywords: Helong interval; Sediment discharge; simulation; Yellow River

黄河是世界上输沙量最大、含沙量最高的河流之一。20 世纪 80 年代以来，黄河的输沙量持续减少，引起了社会的广泛关注。是什么原因造成黄河输沙量巨大、影响输沙量锐减的因子是什么、未来趋势如何等问题是研究黄河泥沙的重点与热点。笔者通过仿真模拟黄河河口镇（头道拐）到龙门区间（河龙区间）年输沙量的变化过程，以期为研究黄河泥沙变化的原因和建立黄河泥沙预测模型提供必要的技术基础。

1 仿真模拟的范围

1.1 空间区域

仿真模拟的空间区域为黄河泥沙主要来源的河龙区间（见图 1）。为了精细地仿真模拟河龙区间年输沙量的变化，根据河龙区间暴雨和泥沙的来源与组成，将河龙区间的 12 万 km² 进行分区。首先以吴堡为界，将河龙区间划分为 2 个降雨亚区，分别是“河吴区间”和“吴龙区间”；然后，将“河吴区间”划分为“陕西北片”和“晋西北片”、将“吴龙区间”划分为“陕西南片”、“无定河片”与“晋西南片”，共 5 个三级区^[1]。



图 1 研究区域和亚区划分示意

1.2 时间区段

模拟的时间段为 1954—2005 年，共有 52 a，包括了河龙区间 20 世纪 80 年代以前的输沙量较大的时段和以后的输沙量锐减时段。

2 模拟的技术路线

2.1 河龙区间输沙量的变化

河龙区间年输沙量的变化主要有两个方面（见图 2）：一是年际间的波动变化，河龙区间年输沙量年际间波动变化显著，其中 1964 年输沙量大于 14 亿 t，而相邻的 1965 年却不到 2 亿 t，差值约 12 亿 t，而且 1966 年又激增到 15 亿 t 以上；二是长期递减变化，截至

2005年河龙区间年输沙量呈现长期持续递减的趋势，从1954年的18亿t以上波动递减到2005年的不到1亿t，绝对变化超过16亿t。

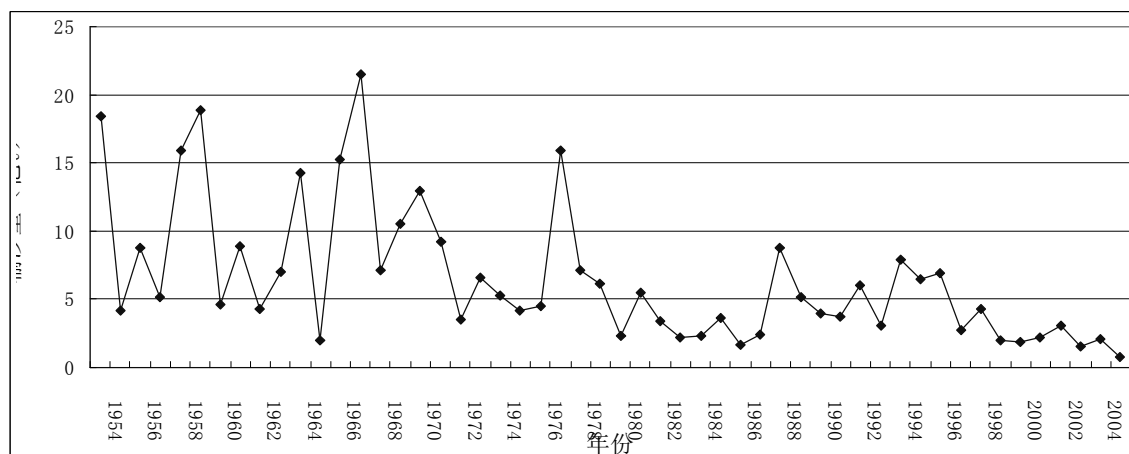


图2 1954—2005年河龙区间实测年输沙量

因此，模拟河龙区间年输沙量的变化，不能简单地以“速写”方式在波动的年输沙量变化过程中划一条直线，或以算术运算方法进行模拟，而需要通过选择和分析计算影响河龙区间年输沙量波动的因子，采用客观的数据和科学的计算方法，“解释”波动的原因，以“素描”的方式，尽可能精细地模拟河龙区间年输沙量年际波动的大小和长期递减的趋势。

2.2 影响河龙区间年输沙量变化的因子简述

降雨是影响河龙区间年输沙量变化的主要因子，主要包括年降雨量、降雨季节、降雨历时、汛期降雨量、暴雨、暴雨笼罩面积、降雨雨区，甚至降雨的雨型等。有关研究表明，暴雨和主汛期降雨是影响区域产沙的主要因子。

人类活动减少输沙量的因子有水土保持、水库、工农业引水、植物（作物）覆盖、农业耕作制度，以及城镇和道路建设等。这些因子中，有的是短暂影响，有的是长期作用；有的影响立竿见影，有的影响逐渐增强；有的可以定量，有的只能定性；有的可以直接获得，有的只能间接推算；有的因子是独立作用，有的因子则互相关联。归纳具有减沙效果的人类活动因子可分为两类：工程技术类和经济社会类。工程技术类的因子主要是直接减少输沙量的工程和技术措施；经济社会类的因子既包括直接减少输沙量的因子，也包括间接减少输沙量的因子。

2.3 因子选择

2.3.1 降雨因子

由于泥沙主要源自汛期降雨（暴雨），因此对于降雨因子，初步选取年降雨量、7—8月降雨量、最大三日降雨量、最大一日降雨量和暴雨笼罩面积等共23个因子。

2.3.2 水土保持因子

水土保持是公认的工程技术因子中直接减少河流泥沙的“治本”措施，水土保持与河龙区间年输沙量之间具有统计相关关系。

在统计上报面积的基础上,根据典型(抽样)调查核对结果,去除水土保持治理措施中人为增加的“水分”和自然造成的损耗,再综合骨干坝(采用2009年逐坝调查数据)坝控面积,形成“水土保持综合治理面积”。

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

$$\text{水土保持治理度} = \frac{\text{水土保持综合治理面积}}{\text{水土流失面积}} \times 100\%$$

2.4 模拟方法

河龙区间年输沙量主要受降雨和下垫面变化的影响。在各种已知和未知因素的作用下,年输沙量的变化具有明显的必然性和偶然性,其遵循统计学规律。因此,需要采用符合客观规律的计算方法来分析变化原因、模拟变化过程,进而认识其变化规律、预测其发展趋势。

将河龙区间泥沙的产生过程视为一个灰箱或者黑箱,采用回归分析方法,筛选具有物理成因概念和含义的解释因子(自变量),对实测数据进行计算处理,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,模拟和解释河龙区间年输沙量变化过程。

研究表明,输沙量与降雨等因子之间表现为非线性相关关系。受各种因素的影响,在宏观层面,这种非线性关系可能十分复杂,为了符合降雨产沙和水保减沙的基本原理,主要以非线性回归计算结果进行分析模拟。相应地,对部分自变量增加对数形式,以获得模拟效果更好的结果。

考虑到同一地区的暴雨、汛期降雨等解释因子可能都对输沙量产生影响,同时各解释因子之间可能存在较高的相关关系,因此在计算中进行因子的多重共线性检验。

3 1954—2005年输沙量仿真模拟

3.1 计算结果

对1954—2005年数据采用逐步回归和手工试算等方法,得到多个模拟效果较好的计算结果。通过对这些计算结果自变量(解释因子)和模拟结果的合理性分析,筛选出由河口镇—吴堡(河吴区间)7—8月降雨量、水土保持治理度、陕西北最大三日降雨量等3个解释因子组成的计算结果,其相关系数为0.886,显著性水平 $\alpha = 0.01$,各因子偏相关系数的也达到较高的显著性水平。经检验,计算结果不存在明显的自相关问题。各解释因子没有重合性和包含性,不存在多重共线性问题。残差基本呈正态分布,同时呈随机散布,无明显变化趋势,符合回归分析的基本假设条件要求。

1954—2005年实测年输沙量与模拟年输沙量比较见图3。从图3可以看出,模拟年输沙量对实测年输沙量模拟的总体变化趋势基本一致。两者52a变化的拟合趋势线基本重合,说明模拟出了1954—2005年河龙区间年输沙量递减的趋势,总体仿真模拟程度较高。除了个别年份外,对于年际变化的模拟也具有较高的相似程度,基本模拟出了河龙区间年输沙量

年际变化的“峰谷”波动：模拟出了河龙区间年输沙量在 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。

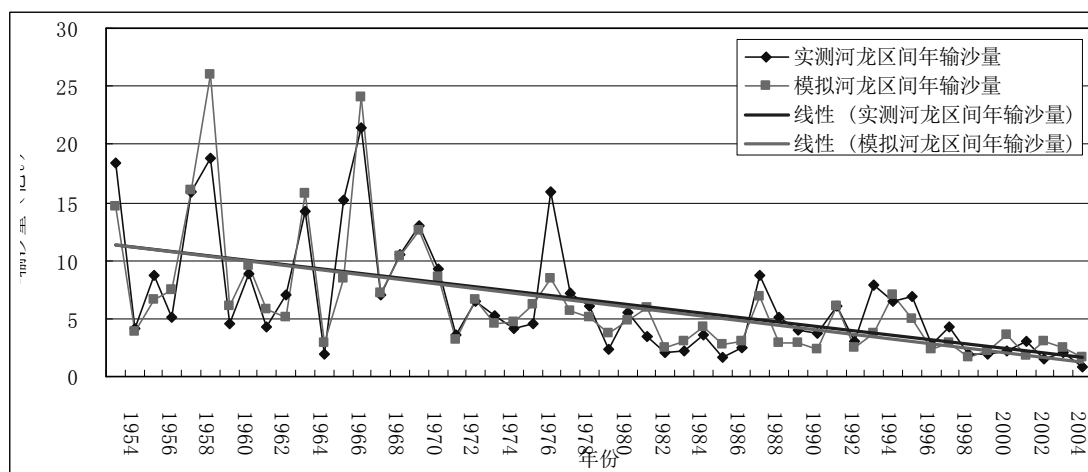


图3 1954—2005 年实测年输沙量与模拟年输沙量比较

1954—2005年实测年输沙量与模拟年输沙量的散点图见图4。

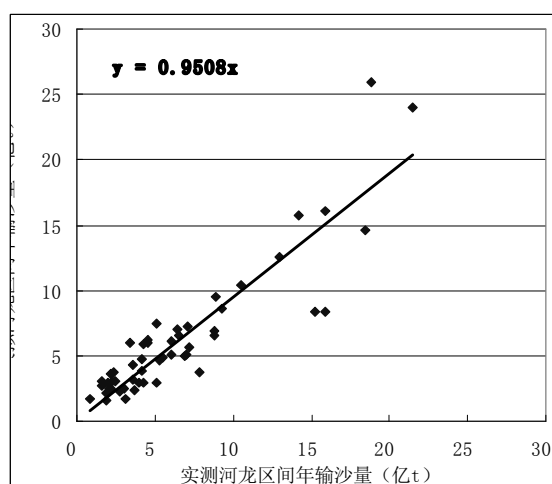


图4 1954—2005年实测年输沙量与模拟年输沙量的散点图

从实测年输沙量和模拟年输沙量散点图中可以看出，数据点基本分布在 $Y=0.9508X$ 的直线附近，说明模拟量十分接近实测量。

3.2 解释变量（自变量）合理性分析

总体上，计算结果中确定的“河吴区间7—8月降雨量”和“陕西北最大三日降雨量”两个涉及降雨的自变量，符合“黄河泥沙主要来自汛期降雨和暴雨”的产沙基本规律。

分析河龙区间和各亚区的年输沙量、降雨因子对1952—2005年河龙区间黄河输沙量的关系可知，河吴区间年输沙量和河吴区间7—8月降雨量均与河龙区间年输沙量的相关关系最为密切。因此，在逐步回归计算中，“河吴区间7—8月降雨量”首先“入选”，是影响1954—2005年河龙区间年输沙量的主要因子；水土保持是黄河减沙的“治本”措施，“水

土保持治理度”在逐步回归计算的第二次计算中“入选”，其解释的主要是河龙区间年输沙量长期递减的变化；“陕西北最大三日降雨量”最后入选，进一步提高了模拟效果。

1954—2005年不同因子模拟结果比较见图5。从图5可以看出，仅以“河吴区间7—8月降雨量”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年代以后输沙量递减的趋势。增加“水土保持度”因子后，对输沙量递减趋势变化的模拟显著提高。增加3个解释因子后，模拟效果又有所提高（见图3）。

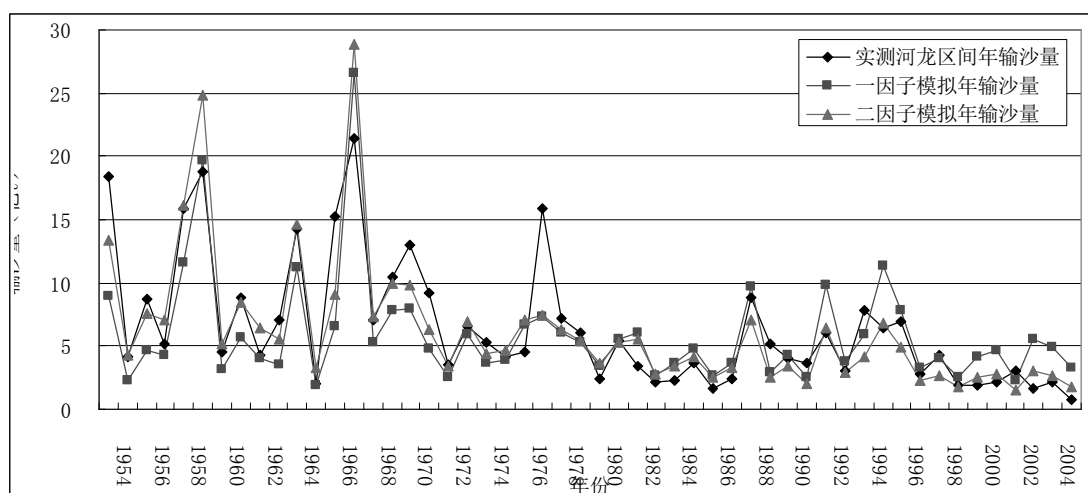


图5 1954—2005年不同因子模拟结果比较

分析3个自变量的偏相关关系，其中河吴区间7—8月降雨量和水保持治理度的显著性水平均达到 $\alpha = 0.01$ ，陕西北最大三日降雨量的显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

总之，黄河产沙的理论和模拟输沙量变化的实践都表明，1954—2005年河龙区间输沙量模拟确定的3个自变量（解释因子）是合理的。

3.3 总体模拟效果分析

从水文学基本原理可知，河流年输沙量的变化遵从统计学规律。因此，采用回归分析方法模拟的输沙量数值与实测输沙量数值之间存在一定的偏差。回归计算结果的准确性又称为拟合优度，判定系数是测定回归计算结果拟合优度的一个重要指标，以下利用判定系数 R^2 评价模拟的准确性。

从回归分析原理知，输沙量的模拟值与实测值之间存在三部分偏差，以二维图形（见图6）表示：实测值与实测多年平均值之差 $(y_i - \bar{y})$ 、实测值与模拟值之差 $(y_i - \hat{y}_i)$ 、模拟值与实测多年平均值之差 $(\hat{y}_i - \bar{y})$ 。

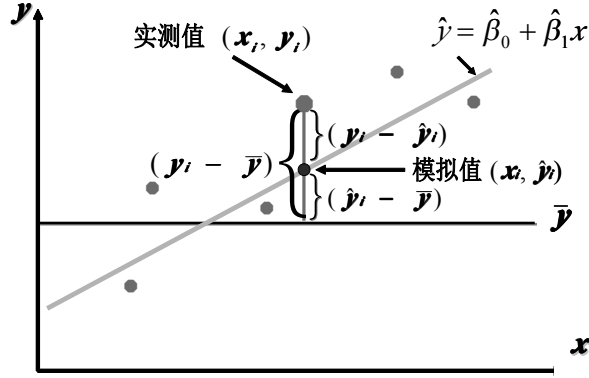


图6 回归分析原理示意

为此，图6的关系可以表示为

$$(y_i - \bar{y}) = (y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y})$$

两端平方后求和有

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

各年输沙量实测值(y_i)与实测多年平均值(\bar{y})之差的平方和为总离差平方和 (SST)，记为

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

各年输沙量实测值(y_i)与各年模拟值(\hat{y}_i)之差的平方和，称为误差平方和 (SSE)，记为

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

各年模拟值(\hat{y}_i)与实测多年平均值(\bar{y})之差的平方和，称为回归平方和 (SSR)，记为

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

SSR 描述了模拟值 $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ 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，模拟值 $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ 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 SSR 反映了线性模拟值与它们的平均值的总偏差，即由自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的变化引起模拟值 $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ 的波动。因此， SSR 反映了在 y 的总离差平方和 SST 中可以用 x 与 y 的直线关系解释的那部分变异。

基于以上分析，判定系数 R^2 的定义为

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

结合式 (1) 和式 (2)，可以看出 R^2 越大，则意味着回归平方和 SSR 在总离差平方和 SST 中占的比重越大，相应的 SSE 在总离差平方和中占的比重越小， \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。

计算结果的判定系数 $R^2 = 0.785$ ，扣除解释因子增加对 R^2 的影响，调整的 $R^2 = 0.772$ 。即由河吴区间 7—8 月降雨量、水土保持治理度、陕西北最大三日降雨量等 3 个解释因子模拟了 1954—2005 年河龙区间黄河输沙量超过 77% 的变化。

3.4 异常值分析

随着时间的变化，标准化残差的散布没有明显的趋势性，绝大多数标准化残差点分布落入 $-2 \sim +2$ 范围内（见图 7）。对于绝对值接近或超过 2 的个别残差，可能存在异常值问题。

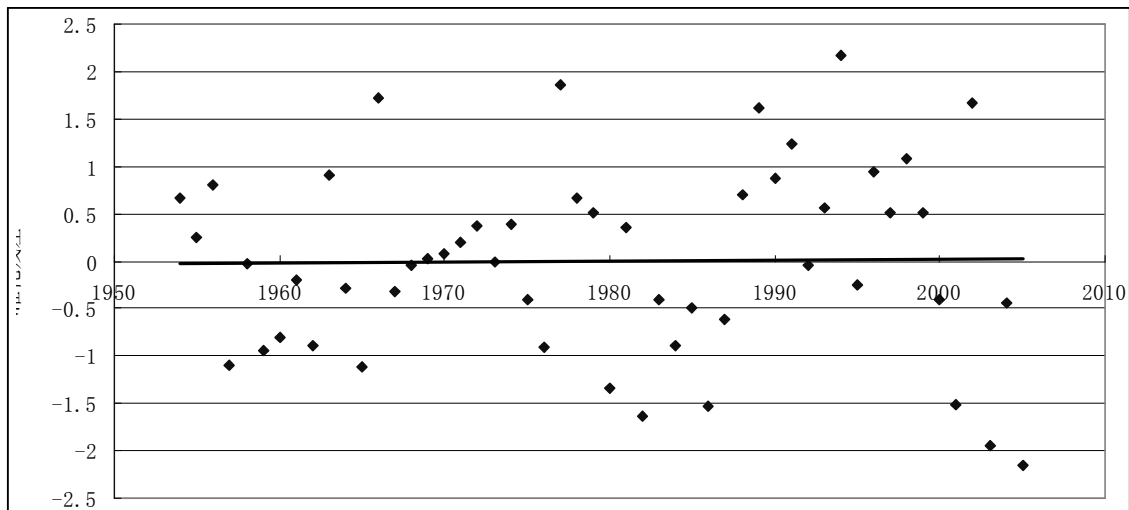


图 7 回归标准化残差散布

偏差较大的模拟值其残差的绝对值也较大。

对于较大正值的标准化残差，产生的原因可能是淤地坝等水土保持设施在大暴雨时损毁增加输沙量，造成模拟值与实测值之间的较大偏差，而“入选”的解释变量不能够“解释”这些泥沙。对于较大负值的标准化残差，原因比较复杂，可能是低估水土保持生态建设的作用，或者是其他因素的影响。

为提高数学模型的应用效果，应该修正或剔除异常值。但是，本研究仅对 52 a 实测输沙量的变化过程进行仿真模拟，主要探索所采用的模拟方法是否合理、研究所选取变量是否准确、分析所采用的数据是否客观，而不对输沙量变化的原因进行深入分析，不对未来输沙量的变化进行预测，因此为保证仿真模拟“原汁原味”，暂不对异常值进行修正或剔除。

4 结 语

采用回归分析的方法，筛选出了河吴区间 7—8 月降雨量、水土保持治理度、陕西北最大三日降雨量等 3 个解释因子组成的回归计算结果，相关系数 R 为 0.886，在 $\alpha = 0.01$ 的水平上高度显著。各解释因子的偏相关系数也达到较高的显著性水平。对 1954—2005 年黄河河龙区间年输沙量的年际波动变化和长期递减变化趋势均进行了仿真模拟，调整的 R^2 达到 0.772，从总体上对河龙区间年输沙量进行了详细地刻画，达到对河龙区间年输沙量变化过程的“素描”的目的，说明拟定的技术路线可行，确定的解释变量合理，采用的计算数据客观。

参考文献：

- [1] 徐建华, 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.

1 收稿日期: 2012-10-11

2 作者简介: 李敏, 1952 年 8 月-, 男, 江苏省徐州市, 教授级高工, 主要从事水土保持方面的工作和水土保持数学模型等领域的研究

3 文章的写作背景: 在黄河流域水土保持规划指标论证和黄土高原水土流失数学模型(第一期)研发项目的分区流域经验模型研究与开发课题研究的基础上完成本文。

4 联系电话: 13991331833

5 电子信箱: limin173@sina.com

6 详细通信地址: 西安市凤城三路 200 号, 黄河上中游管理局, 710021。