

【水文泥沙】

经济社会发展对黄河中游输沙量影响分析

李 敏 王富贵

(黄河上中游管理局 陕西 西安 710021)

摘 要: 以 1954—2006 年黄河中游龙门、华县、河津、淤头四站年输沙量为因变量, 以降雨(包括年降雨、暴雨、暴雨笼罩面积等)和全国 GDP 等 24 个因子为自变量, 采用逐步回归分析方法, 筛选出了由全国年 GDP、河吴区间 7—8 月降雨量和河龙区间年降雨量组成的非线性回归方程。结果表明, GDP 的增加、经济社会的发展对黄河年输沙量的减少, 特别是对 20 世纪 80 年代以来黄河年输沙量的减少产生了主要影响。

关 键 词: 输沙量; GDP; 黄河

中图分类号: TV141; TV882.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1000-4379.2015.03.004

黄河输沙量的变化历来是人们关注的热点之一。20 世纪 50 年代初期以来, 随着我国经济社会的持续发展, 国家对黄河治理的力度不断增加。进入 20 世纪 80 年代, 我国经济社会进入高速发展期, 同期黄河输沙量持续减少。笔者从经济社会发展的角度对黄河输沙量的变化进行了分析研究, 期望从经济社会的宏观层面为研究黄河泥沙变化原因和建立黄河泥沙预测模型提供技术基础。

1 研究范围及输沙量变化情况

1.1 空间区域

黄河泥沙主要来自中游的黄土高原地区, 主要涉及黄河的河口镇—龙门区间(简称河龙区间)、渭河、汾河及北洛河(见图 1), 该区域总面积 30.05 万 km²。1954—2006 年该区域年均输沙量 10.6 亿 t。笔者以河龙区间与渭河(华县站)、汾河(河津站)、北洛河(淤头站), 即黄河龙门、华县、河津、淤头四站(简称四站)年输沙量减去河口镇站的年输沙量作为研究对象进行分析计算。

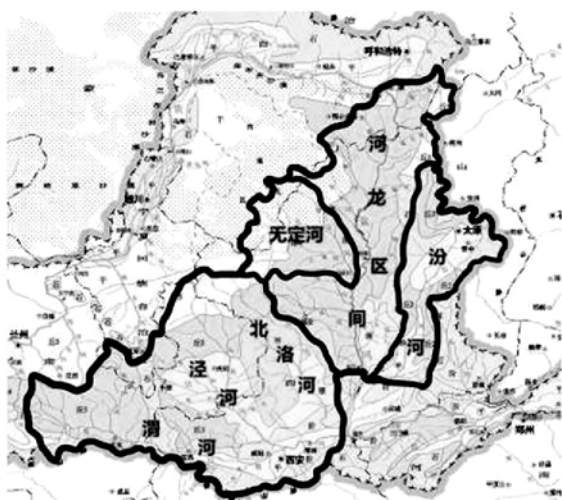


图 1 研究区域示意

1.2 时间区段

本研究的时间区段为 1954—2006 年共 53 a, 包括了 20 世纪 80 年代以前的多沙时期和 80 年代以后的经济社会快速发展和黄河年输沙量持续波动减少阶段。

1.3 输沙量变化

1954—2006 年四站年输沙量变化见图 2, 可以看出, 1954—2006 年四站年输沙量的变化主要有以下几个特点。

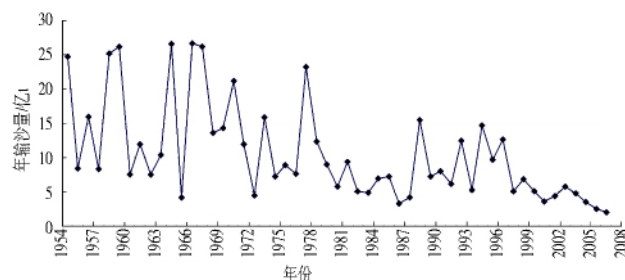


图 2 1954—2006 年四站年输沙量变化

(1) 年输沙量的年际间波动变化剧烈, 其中 1964 年输沙量达到 26 亿 t, 而相邻的 1965 年却不到 4 亿 t, 1966 年又超过 26 亿 t, 年际波动差值超过 20 亿 t。

(2) 黄河输沙量受人类活动等多种因素的影响, 具有长期持续波动递减的趋势。从 1954 年的超过 24 亿 t 波动递减到 2006 年的 2 亿 t, 绝对变化也超过 20 亿 t。

(3) 在 20 世纪 80 年代以前的 20 多 a 中, 有 8 a 的年输沙量超过 20 亿 t, 有 5 a 的年输沙量超过 25 亿 t。而在 80 年代以后, 仅有 1 a 的年输沙量超过 15 亿 t。

收稿日期: 2014-05-18

基金项目: 黄河水利委员会治黄专项(黄水保[2007]19-01)。

作者简介: 李敏(1952—), 男, 江苏徐州人, 高级工程师(教授级), 主要从事水土保持数学模型等领域的研究工作。

E-mail: limin173@sina.com

直观分析 53 a 的年输沙量变化大体可以分成两个时段:前期年输沙量剧烈波动变化期和近期年输沙量波动递减期。因此,分析年输沙量变化不能简单地以“速写”的方式在波动的年输沙量变化过程中画一条直线,或以算术运算方法进行分析,而需要通过分析计算影响年输沙量波动的因子,采用客观的数据和科学的计算方法,分析造成年输沙量变化的原因。

2 经济社会因子简述

黄河治理与我国经济社会发展紧密相关。黄河输沙量是黄河治理的重要标志性指标。20世纪80年代以来,随着我国经济的持续发展,国家加强了基础设施建设,注重大江大河治理和水土保持生态建设,颁布了涉及各个领域的保护江河水生态的法律法规,实施了一系列治理黄河水土流失的工程项目,使黄河年输沙量显著减少。国家的经济社会发展状况与黄河治理紧密相关,总体上呈经济社会发展是“因”,黄河输沙量减少是“果”的关系。

在经济社会发展的人类活动中,既有工程措施,例如水土保持、水库、工农业引水、植物(作物)覆盖,以及城镇化建设、各类基础设施建设等;也有非工程措施,例如国家和地方各级政府颁布有关保护生态环境、治理水土流失的法律法规,改进农林牧各业生产方式,农村劳动力素质的提高和劳动力的转移等。这些因子,有的是短暂影响,有的是长期作用;有的影响是立竿见影,有的影响是逐渐增长;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,有的则互相关联。其中,工程技术类的因子直接减少了黄河输沙量;经济社会类的因子既包括直接减少黄河输沙量的因子,也包括间接减少黄河输沙量的因子。

各种生产建设和经济社会活动均与经济发展有密切的关系。例如GDP既是生产建设和社会活动的结果,又对生产建设和社会活动产生直接影响,常被公认为衡量国家经济状况的最佳指标。GDP不但可以反映一个国家的经济表现,可以反映国力与财富,而且承载了文明进步、社会发展等大量信息。经济的发展,增加了治理黄河的工程项目;国力的提高,注重了对生态环境的保护,加强了相关立法和执法;产业结构调整,加大了农村劳动力的转移,减轻了土地的耕作强度和水土流失。

根据国家统计局公布的数据,我国GDP从1954年的859.38亿元,增长到2006年的216 314.43亿元

(见图3)。从图3可以看出,在20世纪80年代以前,我国GDP长期在低位徘徊,自80年代开始,我国经济社会发展进入“以经济建设为中心”的时期,GDP呈现非线性快速增长趋势。

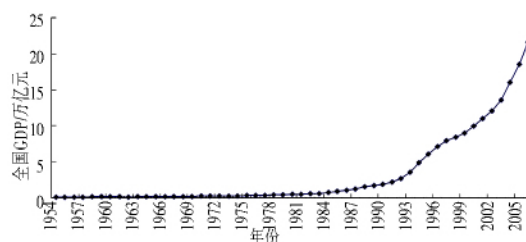


图3 1954—2006年全国万亿元GDP变化

笔者将GDP作为经济社会发展的数值性载体,研究其对黄河年输沙量的趋势性影响与作用。

3 技术路线

3.1 降雨因子的选择

由于黄河泥沙主要源自河龙区间的汛期降雨(暴雨),因此对于自变量,初步选取四站控制区域的年降雨量,以及河龙区间年降雨量、7—8月降雨量、最大3d降雨量、最大1d降雨量和日降雨量大于25mm年累计面积等。

河龙区间是黄河中游三大暴雨区之一,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经济社会发展对黄河输沙量的影响,将河龙区间划分为5个亚区(见图4),其中的陕西北片和晋西北片可合并为河吴区间片^[1],采用这些亚区7—8月降雨量、最大3d降雨量和最大1d降雨量等作为解释黄河年输沙量的自变量。

以上共初步选择24个降雨因子。



图4 河龙区间降雨分区示意

3.2 分析方法

在各种已知和未知因素的作用下,黄河年输沙量的变化具有偶然性和必然性,遵循统计学规律。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。

将黄河泥沙的产生过程视为一个灰箱或者黑箱,以四站实测输沙量作为因变量,选择具有物理成因的降雨和 GDP 因子作为自变量,采用逐步回归分析方法对 1954—2006 年共 53 a 的实测资料进行计算处理,建立符合水文学基本原理、模拟效果好的回归模型,模拟解释四站输沙量变化过程,分析讨论 GDP 对黄河年输沙量的影响^[2]。

采用回归分析方法模拟的输沙量与实测输沙量相比存在一定的偏差,采用判定系数(R^2)评价模拟结果的准确性。

从回归分析原理知,输沙量的计算值与实测值存在三种偏差(见图 5):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($\hat{y}_i - \bar{y}$)。

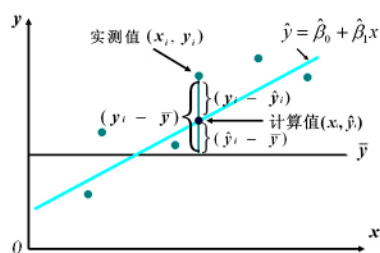


图 5 回归分析原理示意

三种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。

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

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

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

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。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)可以看出, R^2 越大,则意味着回归平方和在总离差平方和中占的比重越大,相应的误差平方和在总离差平方和中占的比重越小, \hat{y}_i 对 y 的拟合程度越高,即该回归计算结果的准确度越高。

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百分数。

考虑到多元回归中自变量增加的影响,调整的判定系数为

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

式中: n 为样本容量; p 为自变量的个数。

4 输沙量影响因素分析

1954—2006 年是黄河年输沙量变化较大、变动复杂的时期。相应地,该时期我国经济社会的发展也呈现波动发展的趋势, GDP 从 1954 年的 0.085 9 万亿元低位波动增长到 1978 年的 0.364 5 万亿元,其后又高速增长到 2006 年的 21.63 万亿元。分析这一时期黄河年输沙量变化,讨论影响因子,研究长系列条件下经济社会发展对黄河年输沙量的影响。

4.1 计算结果

根据设定的条件,逐步回归进行了三次因子筛选计算。第三次计算结果表明,以河吴区间 7—8 月降雨量、全国 GDP 和河龙区间年降雨量三个因子可以解释 76% 以上的黄河年输沙量变化。总体上回归方程的相关系数(R)达到 0.881,在 $\alpha = 0.001$ 的水平上高度显著。采用 D. W 方法进行自相关检验,计算结果 D. W = 1.705,表明不存在序列自相关,该回归方程为

$$y = 1.956167e^{0.003663x_1 - 0.05757x_2 + 0.00504x_3} \quad (3)$$

式中: y 为年输沙量,亿 t; x_1 为河吴区间 7—8 月降雨量; x_2 为全国 GDP,万亿元; x_3 为河龙区间年降雨量, mm。

计算出式(3)各年的数值,并与实测值进行比较(见图 6)。从图 6(a)可以看出,以河吴区间 7—8 月降雨量、全国 GDP 和河龙区间年降雨量三个因子与年输沙量建立的非线性回归方程不仅较好地描述了黄河年输沙量的年际波动变化,而且很好地解释了年输沙量长期递减的变化趋势,达到了对 53 a 黄河中游年输沙量变化过程的“素描”,为进一步分析 GDP 对年输沙量的影响奠定了基础。再做出计算年输沙量与实测年输沙量的散点图进行比较(见图 6(b)),可以看出,计算年输沙量(y)是实测年输沙量(x)的 0.895 9 倍;在

年输沙量小于 20 亿 t 的区域,计算值与实测值差别较小,当年输沙量大于 20 亿 t 时,计算值与实测值差别较大。

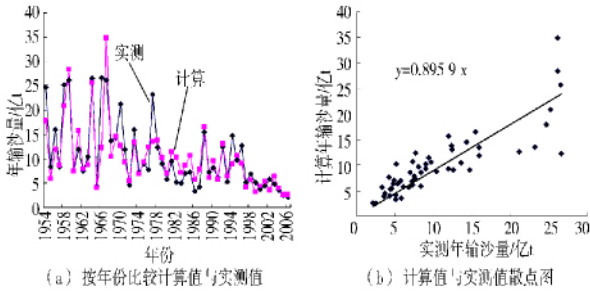


图 6 计算四站年输沙量与实测年输沙量比较

对计算结果的方差分析表明,经过三次计算,残差越来越小,第三次计算结果的残差为 4.896,仅占总离差的 22.4%,说明回归方程具有较高的解释程度。

再对每年的标准化残差进行分析(见图 7),结果表明,标准化残差基本呈正态分布,以 $y=0$ 为中心线上下波动,拟合的线性回归直线位于标准化残差等于 0 的位置,呈水平直线,不随 $\ln(\text{年输沙量计算值})$ 变化而变化,没有呈现趋势性。第三标准化残差点全部分布在 $-3 \sim 3$ 的区域中。

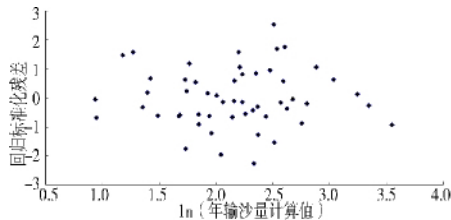


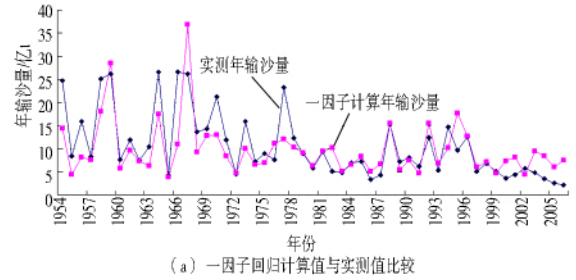
图 7 回归标准化残差与 $\ln(\text{年输沙量计算值})$ 的散点图

4.2 不同自变量计算结果比较

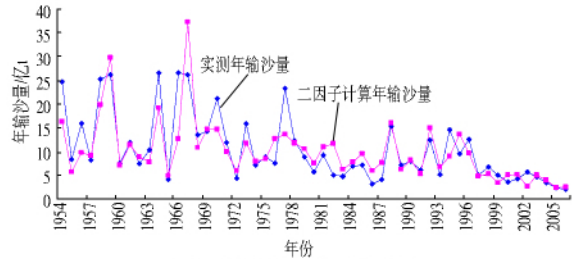
比较各次回归计算的结果,进一步分析 GDP 对黄河年输沙量的影响。

从上述计算结果知,逐步回归的第一次计算筛选出的河吴区间 7—8 月降雨量仅解释了年输沙量超过 50% 的变化,残差平方和仍然有 10.25,计算结果与实测年输沙量的差距较大(见图 8(a)),特别是对 20 世纪 80 年代以来年输沙量持续波动减少的现象不能进行解释。当逐步回归进行了第二次计算,增加了 GDP 自变量,由河吴区间 7—8 月降雨量和 GDP 两个自变量组成的回归方程解释了黄河中游年输沙量 73% 的变化(见图 8(b)),回归方程的残差平方和减少到 5.673。这一结果除总体上使回归方程的相关性有进一步提高外,还较好地解释了 80 年代以来黄河中游年输沙量持续波动递减的变化,说明了 GDP 的增长、国家经济社会的发展对黄河中游年输沙量的减少产生了重大的影响。第二次计算得到的回归方程已经与实

测年输沙量比较接近(见图 8(b)),经过第三次计算得到由三个自变量组成的回归方程计算值和实测值的差距又有所减小(见图 6(a))。



(a) 一因子回归计算值与实测值比较



(b) 二因子回归计算值与实测值比较

图 8 不同自变量回归方程计算值与实测值比较

4.3 2006 年 GDP 条件下黄河输沙量变化分析

将 GDP 因子固定在 2006 年水平,通过该回归方程计算出在 2006 年 GDP 水平下,河吴区间 7—8 月降雨量和河龙区间年降雨量与黄河中游年输沙量的三维变化曲面(见图 9(a)),观察和分析两个降雨因子下黄河年输沙量的变化。为了全面分析 GDP 对黄河年输沙量的影响,作为与 2006 年 GDP 的对照,同时作出 1954 年 GDP “断面”的三维图形(见图 9(b))。

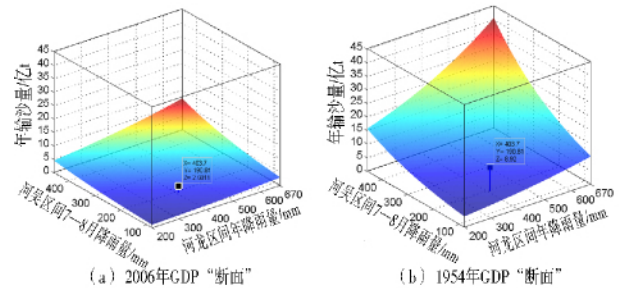


图 9 两个 GDP “断面”下黄河中游年输沙量变化

首先,在回归方程中,由于河吴区间 7—8 月降雨量对黄河中游年输沙量的影响显著大于河龙区间年降雨量,因此图 9 中的四边形曲面中,对应于河吴区间 7—8 月降雨量从大到小变化较大,更陡峭;而对应于河龙区间年降雨量从大到小变化较小,较平缓。

其次,对照图 9(a) 和图 9(b) 可以看出,在 2006 年的经济社会发展水平下,即使河吴区间 7—8 月降雨量和河龙区间年降雨量均处于研究系列的最大值,黄河中游年输沙量也不到 12 亿 t;而在 1954 年 GDP 水平下,相同的降雨条件,计算的极端输沙量超过 40 亿

t。说明了 GDP 的变化、经济社会的发展对黄河中游年输沙量的影响巨大。

再次,在 2006 年降雨条件下,计算的黄河中游年输沙量仅 2.58 亿 t(实测值为 2.09 亿 t)。而在相同的降雨条件下,1954 年 GDP 水平下计算的黄河中游年输沙量达到 8.92 亿 t,是 2006 年 GDP 水平年输沙量的近 3.5 倍。

为了直观地分析 GDP 对黄河中游年输沙量的影响程度,将图 9(a)和(b)放在一起,并做出不同视角的三维图形(见图 10),进一步比较 1954 年和 2006 年 GDP 水平下的黄河中游年输沙量变化特点。从图 10 看出,两个曲面的间距随降雨量的增加而显著扩大,这一现象说明 GDP 的增加显著减少了不利降雨条件下黄河的输沙量:降雨量越大,GDP 的增加对减少黄河中游年输沙量的贡献越大。

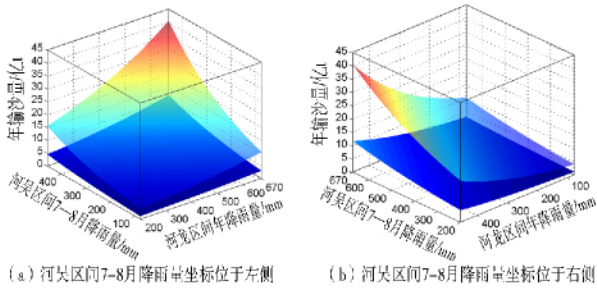


图 10 不同 GDP 水平 相同降雨条件时黄河中游年输沙量变化曲面比较

5 输沙量变化滞后 GDP 增长问题分析

一般来说,产出与投入之间存在一定的时间滞后。分析结果表明,黄河减沙与 GDP 之间存在较模糊的滞后关系。分析黄河年输沙量变化滞后 1~10 a 的结果(见图 11)可以看出滞后效果微弱,不明显。在滞后 1~4 a 时,相关关系和判定系数呈略有增加的趋势;滞后 5 a 时又有降低(见图 11(a)),而且标准差随滞后年限的增加而呈增加的趋势(见图 11(b))。总体上,相关系数仅在小数点后第二位发生变化,且总的变化幅度仅为 0.02 左右。其中,滞后 1~5 a 的相关系数变化幅度仅为 0.01 左右。由于我国实行五年计划的经济方式,继续分析超过 5 a 的滞后无意义。分析黄河输沙量滞后 GDP 认为,影响黄河输沙量的经济社会因素十分复杂,其中既有工程性的,也有非工程性的;有经济技术的,有劳动力变化的,也有政策法规的;有的滞后经济发展,有的则超前社会进程,难以科学、合理地确定黄河年输沙量滞后 GDP 影响的年数。因此,综合考虑这些因素的影响和数据计算结果,不对年

输沙量滞后年 GDP 的情况进行计算处理。

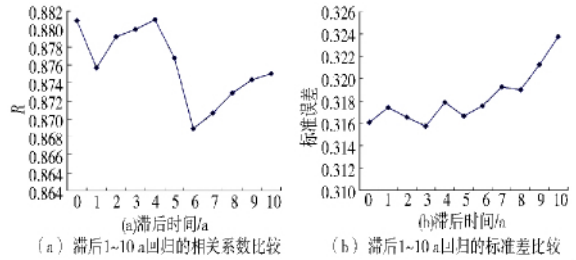


图 11 GDP 滞后计算结果

6 结论与讨论

6.1 计算结果符合水文学基本原理

筛选出的两个降雨因子包括了研究区域的主要降雨影响因子,这些因子符合“黄河泥沙主要来自河龙区间、主要来自汛期暴雨”的产沙基本规律。

筛选出的各降雨因子对输沙量的影响均为正(增加输沙量)影响,GDP 对年输沙量是负(减少输沙量)影响,各回归系数从性质上符合理论与实际。

6.2 计算结果与影响因子具有较高的相关程度

回归分析的基本思想是用模型中包含的自变量来“解释”因变量的变化。因此,自变量和因变量要有较高的相关性。总体来说,逐步回归计算结果的复相关系数(R)达到 0.881,计算结果在 $\alpha = 0.001$ 的水平上高度显著。

不仅自变量和因变量有较高的相关性,计算结果与实测值还有较高的相似性。逐步回归计算结果的判定系数 $R^2 = 0.762$,说明计算结果在 $\alpha = 0.001$ 的高显著性水平上对四站输沙量 76.2% 的变化进行了解释。

总体上,1956—2006 年系列的逐步回归计算结果除对 53 a 黄河中游输沙量的递减变化趋势进行了很好的模拟外,对黄河中游输沙量的年际波动变化也进行了较好的解释,对四站输沙量进行了详细的刻画,做出了对四站输沙量变化过程的“素描”。

6.3 经济社会发展对黄河中游年输沙量的减少产生了主要的影响

通过不同因子对比分析表明,仅由降雨因子不能很好地解释 20 世纪 80 年代以来黄河年输沙量锐减的趋势。增加了 GDP 因子后,回归方程很好地解释了这一变化趋势,说明了经济社会发展是造成 80 年代以来黄河中游年输沙量持续波动减少的主要因素。

在 2006 年 GDP 水平下,计算的黄河中游年输沙量仅为 2.6 亿 t;而在相同的降雨条件下,1954 年 GDP 水平下计算的黄河中游年输沙量将接近 9 亿 t,是 2006 年 GDP 水平年输沙量的近 3.5 倍。(下转第 20 页)

- 遇分析[J]. 人民长江 2008, 39(17): 103-105.
- [3] 戴昌军, 梁忠民. 多维联合分布计算方法及其在水文中的应用[J]. 水利学报 2006, 37(2): 160-165.
- [4] 闫宝伟, 郭生练, 肖义. 南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇研究[J]. 水利学报 2007, 38(10): 1178-1184.
- [5] 康玲, 何小聪, 熊其玲. 基于贝叶斯网络理论的南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇风险分析[J]. 水利学报 2010, 41(8): 908-913.
- [6] 马秀峰, 夏军. 游程概率统计原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社 2011.

Analysis of Wet – Dry Encounter Between Source Area and Receiving Area of the South-to-North Water Transfer Project

MA Xiufeng¹, LIU Hechang², HU Yiming², LIANG Zhongmin²

(1. Hydrologic Bureau, YRCC, Zhengzhou 450004, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the average month – runoff series of Danjiangkou Reservoir covering the period of 1954—2009 and the rainfall series of Zhengzhou Area at the same period, the theory of run was employed to calculate the distribution probability and return period of drought with given length under four different kinds of asynchronous – synchronous encounter combinations, i. e., B(low flow) – B, A(ample flow) – A, A – B and B – A. The results show that when the intercept level is fixed, the return period of drought events with longer length is greater; drought return period increases as intercept level improves when the run length remains unchanged. In term of the run events with the same intercept level and run length, the B – B encounter combination is the easiest to occur, the next one is the A – A encounter combination, and B – A is the last one.

Key words: theory of run; ample flow and low flow encounter; Zhengzhou area; Danjiangkou Reservoir; South – to – North Water Transfer Project

【责任编辑 翟成亮】

(上接第16页)

在2006年GDP水平下,即使降雨处于最不利状况,计算的年输沙量也小于12亿t。

以上计算结果说明,GDP的增加、经济社会的发展是黄河年输沙量减少的主要原因。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] 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.

Analysis of the Impact of Economic and Social Development to the Sediment Load of the Middle Yellow River

LI Min, WANG Fugui

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

Abstract: Based on the Yellow River four station annual sediment yield in 1954 – 2006 as dependent variable, with 24 factors of rainfall (including annual rainfall, heavy rain, storm enveloped the area, etc.) and the national GDP as independent variables, using regression analysis, filtering out three independent variables (national GDP, the July – August rainfall of Hekouzhen to Wubao reach and the annual rainfall of Hekouzhen to Longmen reach) and construction the non – linear regression equation. The results show that the increasing of GDP and economic and social development are major impact of reducing annual sediment load of the Yellow River, especially they are major impact of reducing annual sediment load of the Yellow River since the 1980s.

Key words: sediment yield; GDP; Yellow River

【责任编辑 文云霞】