

# 黄河中上游流域水沙变异关系模型研究

落全富<sup>1</sup>, 包为民<sup>2</sup>, 陈文波<sup>1</sup>, 汪勤海<sup>1</sup>, 孙青雪<sup>1</sup>, 金樊<sup>1</sup>, 王正华<sup>2</sup>

(1.杭州市水库管理服务中心, 浙江 杭州 311305; 2.河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** [目的] 开展黄河流域水沙变异关系模型研究, 为流域水沙变化研究提供理论支持。[方法] 从黄河中上游流域水沙变异影响因素分析入手, 推导出以微分为基础的水沙变异关系模型。[结果] 模型通过黄土高原和黄河中上游流域 7 个测站控制流域输沙率和流量变异变量的模拟检验, 获得了 7 个流域输沙率和水流变异模拟平均有效性系数为 0.860 和 0.887, 平均相对误差分别为 14.8% 和 6.7%。[结论] 从水流变异、泥沙变异模拟精度和各因素变异贡献比例 3 个层面检验了模型, 初步证明了模型结构的合理性和模拟实际泥沙变异具有的高有效性。

**关键词:** 水沙变化; 物理成因; 微分; 变异模型; 黄河流域

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2021)02-0156-06

**中图分类号:** P338

**文献参数:** 落全富, 包为民, 陈文波, 等. 黄河中上游流域水沙变异关系模型研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2):156-161. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.021; Luo Quanfu, Bao Weimin, Chen Wenbo, et al. Physical mechanism and model of runoff and sediment variation in watersheds of middle and upper reaches of Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):156-161.

## Physical Mechanism and Model of Runoff and Sediment Variation in Watersheds of Middle and Upper Reaches of Yellow River

Luo Quanfu<sup>1</sup>, Bao Weimin<sup>2</sup>, Chen Wenbo<sup>1</sup>, Wang Qin Hai<sup>1</sup>, Sun Qingxue<sup>1</sup>, Jin Fan<sup>1</sup>, Wang Zhenghua<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Reservoir Management Service Center, Hangzhou, Zhejiang 311305, China;

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

**Abstract:** [Objective] The relationship model of variation of water and sediment in the Yellow River basin was studied, in order to provide theoretical support for the study on the variation of water and sediment in the basin. [Methods] The driving factors of the variation of water and sediment in watersheds of middle and upper reaches of the Yellow River were analyzed, and the relationship model of the variation of water and sediment was deduced based on differentiation. [Results] According to the simulation test of the variation of sediment transport rate and flow at seven stations in the Loess Plateau and the middle and upper reaches of the Yellow River, the average validity coefficient of the model was 0.860 and 0.887, and the average relative error was 14.8% and 6.7%, respectively. [Conclusion] The model have been tested from three aspects; the simulation accuracy of flow variation, sediment variation and the contribution ratio of variation of each factor, which preliminarily proves the rationality of the model structure and the high effectiveness of the simulated sediment variation.

**Keywords:** runoff and sediment variation; physical causes; differentiation; variation model; the Yellow River basin

全球气候变化和人类活动影响加剧, 导致水文系列均值的变化, 使得系列具有不一致性和变异性<sup>[1]</sup>。特别黄河流域泥沙锐减现象全球瞩目, 但其减少原因、成因机理至今罕有深入研究<sup>[2]</sup>, 以致泥沙减少是由气候变化还是水保措施作用所致或各因素的贡献比例多大等问题一直难以解决<sup>[3-8]</sup>。黄土高原, 由于

水土保持措施、退耕还林、生态保护等技术与政策措施作用, 河流水沙产生了显著变化, 水沙变化原因已成为研究热点。目前研究的方法主要有概念水文模型为基础的分类定量评估法、时间系列变化趋势分析法和驱动因素分析法<sup>[9-10]</sup>。用水文概念性模型对泥沙变化原因进行分类定量评估是研究较早的方法, 概

收稿日期: 2020-10-23

修回日期: 2020-12-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于富里衰级数的河段水流模型结构误差研究”(51279057)

第一作者: 落全富(1976—), 男(汉族), 山西省朔州市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水库预报调度、水利信息化建设方面的工作。Email: 41394266@qq.com。

通讯作者: 包为民(1956—), 男(汉族), 浙江省东阳市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源及环境方面的研究。Email: wmbao163@163.com。

念性模型具有的物理成因关系,定量确定影响因素变化与泥沙变化量的关系<sup>[11-14]</sup>。这类方法的优点是物理成因机理清楚,缺点是要求资料多,实际常难以满足模型要求。如黄河流域泥沙概念模型,涉及超渗产流计算,要求有 1 h 甚至 5 min 间隔的时段雨量资料<sup>[14-15]</sup>,这对于变化原因分析要求有 50 a 以上的长系列计算,是非常困难的。赵羽西和谢平等的变异分级方法、Mann-Kendall 突变检验法、Pettitt 法、有序聚类分析法和 Bernal-Galvan 分割法是趋势分析法有代表性的成果<sup>[1,16-21]</sup>。这些方法虽然要求资料较少,但只能分析是否存在变异和确定系列的突变点及变异程度。驱动因素分析法,直接建立影响因素与泥沙变异之间的关系,是近期开始为水流泥沙变异规律研究所重视的。如 Wang 等<sup>[2]</sup>根据输沙量( $S$ )等于降雨量( $P$ )、径流系数( $a$ )和含沙量( $s$ )相乘的特殊关系  $S = Pas$ ,推导了输沙量变化与 3 者间变化的微分关系:

$$\frac{dS}{S} = \frac{dP}{P} + \frac{da}{a} + \frac{ds}{s} \quad (1)$$

该研究开辟了变异规律研究的新途径,但这关系还存在局限性。首先不能用于一般问题的分析中,特别是人类活动因素对泥沙变化的影响不能直接反映;其次含沙量  $s$  与输沙量  $S$  类似都受降雨、径流系数、人类活动因素的影响;还有径流系数和含沙量已知相当于输沙量已知,所以这两因素同时作为输沙量关系的自变量相当于自己与自己建立关系,是不合适的,通常含沙量不能作为输沙量模型的自变量。为此,本研究从水沙变异影响因素分析入手,研究黄河中上游流域水沙变异与影响因素变异间的物理成因关系,定义了变异变量,推导了以微分为基础的水沙变异关系模型,并用实际水沙系列进行了模拟论证和变化原因定量分析。

## 1 模型结构研究

水文系列变化通常受气候和人类活动两个层面的因素变化影响,气候因素变化具有周期性,其均值和方差等统计量随周期变化不大,而水文系列变异是指由均值和方差等特征统计量改变的变化。所以,时间系列变异规律和模型研究,首先要考虑如何消除气候周期性变化的影响,使得变异规律突显并简化变异模型结构。

### 1.1 变异变量定义与公式

要研究泥沙变异规律和构造变异模型,首先要定义变异变量。对于泥沙时间系列的变异或突变点检测等研究问题,变异或突变通常是指均值的变化。对于自然因素的均值变化,通常都是连续变化的,只不

过变化速度突然加快,给人感觉产生了突变。因此,可以用一定时期的滑动平均构建变异变量,以消除周期内的气候变化因素影响。

设有时间样本系列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_L$ , 可以构建向后滑动平均变量  $B$

$$B_i = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T x_{i-j+1} \quad (i = T, T+1, \dots, L-T) \quad (2)$$

式中:  $T$  为时间系列变化周期;  $i$  表示时间序列;  $L$  为序列长度。类似地有向前滑动平均变量  $F$

$$F_i = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T x_{i+j} \quad (i = T, T+1, \dots, L-T) \quad (3)$$

反映均值变化的变量  $V$  和变异量  $\Delta V$  计算公式分别为

$$V_i = (B_i + F_i) / 2, \quad \Delta V_i = B_i - F_i \quad (4)$$

由公式(4)所表达的要素变异反映了滑动平均值的变化量,其值的绝对值越大表示变异越剧烈。

流域泥沙变化,影响因素有降雨、水流、植被、水利工程等。研究泥沙变异规律与模型,就是要研究这些类型因素变异与泥沙变异之间的因果关系。根据上述变异变量定义,对下面物理因素量有相应的表达。如泥沙  $S$  向后滑动平均变量  $SB$  为

$$SB_i = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T s_{i-j+1} \quad (i = T, T+1, \dots, L-T) \quad (5)$$

向前滑动平均变量  $SF$

$$SF_i = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T s_{i+j} \quad (i = T, T+1, \dots, L-T) \quad (6)$$

反映均值变化的变量  $SV$  和变异量  $\Delta SV$  如下

$$SV_i = (SB_i + SF_i) / 2, \quad \Delta SV_i = SB_i - SF_i \quad (7)$$

其他植被因素  $C$ , 降雨  $P$ , 水流  $Q$ , 水利工程因素  $W$  都可以类似地构建。 $C$  均值变化为  $CV_i$ ;  $C$  变异量为  $\Delta CV_i$ ;  $P$  均值变化为  $PV_i$ ;  $P$  变异量为  $\Delta PV_i$ ;  $Q$  均值变化为  $QV_i$ ;  $Q$  变异量为  $\Delta QV_i$ ;  $W$  均值变化为  $WV_i$ ;  $W$  变异量为  $\Delta WV_i$ 。

### 1.2 变异模型推导

考虑降雨、水流、植被覆盖度和水利工程指标与泥沙的一般关系:

$$S = f(Q, C, W, P) \quad (8)$$

式中:  $P$  为降雨量(mm);  $Q$  为流量( $m^3/s$ );  $C$  为植被覆盖度,表示植被占流域面积比例;  $W$  为水利工程指标,表示水利工程占流域面积比例。

有微分表达

$$dS = \frac{\partial S}{\partial Q} dQ + \frac{\partial S}{\partial C} dC + \frac{\partial S}{\partial W} dW + \frac{\partial S}{\partial P} dP \quad (9)$$

该微分模型对于任意的泥沙关系都是通用的,关键是不知公式(8)的具体结构,所以无法获得各项偏导数的具体表达函数。根据大量泥沙研究表明<sup>[22-26]</sup>,

通用土壤流失方程是很有效的模型。该模型把土壤侵蚀量表达为:

$$S = b_0 Q^{b_1} C^{b_2} W^{b_3} P^{b_4} \quad (10)$$

式中:  $b_0, b_1, b_2, b_3$  和  $b_4$  为常参数。其中  $S$  对  $Q$  的偏导数据公式(10)可推导得:

$$\frac{\partial S}{\partial Q} \approx b_0 b_1 Q^{b_1-1} C^{b_2} W^{b_3} P^{b_4} = b_1 \frac{S}{Q} \quad (11)$$

类似地有

$$\frac{\partial S}{\partial C} \approx b_2 \frac{S}{C}, \frac{\partial S}{\partial W} \approx b_3 \frac{S}{W}, \frac{\partial S}{\partial P} \approx b_4 \frac{S}{P} \quad (12)$$

将  $S$  对  $Q, C, W$  和  $P$  求偏导的结果代入公式(9), 得到泥沙与其影响因素的微分模型如下

$$dS = b_1 \frac{S}{Q} dQ + b_2 \frac{S}{C} dC + \dots + b_3 \frac{S}{W} dW + b_4 \frac{S}{P} dP \quad (13)$$

将上文定义的变异变量看作是上式中的  $dS, dQ, dC, dW, dP$  微分变量, 则  $SV$  对变量  $QV, CV, WV, PV$  的偏导数就可以类似地表达为:

$$\frac{\partial SV}{\partial QV} = b_q \frac{SV}{QV}, \frac{\partial SV}{\partial CV} = b_c \frac{SV}{CV} \quad (14)$$

$$\frac{\partial SV}{\partial WV} = b_w \frac{SV}{WV}, \frac{\partial SV}{\partial PV} = b_p \frac{SV}{PV}$$

和

$$\frac{SV}{QV} = \frac{SV+SF}{QB+QF}, \frac{SV}{CV} = \frac{SB+SF}{CB+CF} \quad (15)$$

$$\frac{SV}{WV} = \frac{SB+SF}{WB+WF}, \frac{SV}{PV} = \frac{SB+SF}{PB+PF}$$

由此可得泥沙变异与影响因素变异的关系:

$$\Delta SV = b_q \frac{SV}{QV} \Delta QV + \dots + b_c \frac{SV}{CV} \Delta CV + b_w \frac{SV}{WV} \Delta WV + b_p \frac{SV}{PV} \Delta PV \quad (16)$$

式中:  $b_q, b_c, b_w, b_p$  为常系数。类似地可以推导得水流的变异公式:

$$\Delta QV = c_p \frac{QV}{PV} \Delta PV + \dots + c_c \frac{QV}{CV} \Delta CV + c_w \frac{QV}{WV} \Delta WV + c_e \frac{QV}{EV} \Delta EV \quad (17)$$

式中:  $c_e, c_p, c_c$  和  $c_w$  为常系数;  $\Delta EV$  为年蒸发变异量, 类似地

$$\frac{QV}{PV} = \frac{QB+QF}{PB+PF}, \frac{QV}{CV} = \frac{QB+QF}{CB+CF} \quad (18)$$

$$\frac{QV}{WV} = \frac{QB+QF}{WB+WF}, \frac{QV}{EV} = \frac{QB+QF}{EB+EF}$$

公式(15)~(18)就是以微分理论为基础的水沙变异模型。

## 2 模型检验与结果与分析

### 2.1 流域特征

本次检验选择了黄河中上游的 7 个流域, 流域特征及测站名称详见表 1。这些流域面积变化范围为 8 515~682 166 km<sup>2</sup>, 控制黄河流域面积的 91%, 资料系列较长, 普遍在 53 a 以上, 这些流域的模型检验, 无论是流域尺度、空间地理位置和资料系列长度考虑, 都具有很好的代表性。

表 1 研究流域基本特征

序号	河流名称	测站名称	流域面积/km <sup>2</sup>	资料年份
1	窟野河	温家川	8 515	19600101—20151231
2	汾河	河津	38 728	19640101—20151231
3	黄河	头道拐	361 640	19640101—20151231
4	黄河	龙门	494 470	19640101—20151231
5	黄河	潼关	682 166	19620101—20151231
6	无定河	丁家沟	29 662	19600101—20151231
7	黄河	吴堡	433 514	19600101—20151231

### 2.2 精度指标

本研究采用的模型计算精度评价指标有有效性系数  $DC$ :

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=T}^{L-T} (\Delta SV_i - \Delta SV_{ci})^2}{\sum_{i=T}^{L-T} (\Delta SV_i - \overline{\Delta SV})^2} \quad (19)$$

相关系数  $RR$ :

$$RR = \frac{\sum_{i=T}^{L-T} (\Delta SV_i - \overline{\Delta SV})(\Delta SV_{ci} - \overline{\Delta SV_c})}{\sqrt{\sum_{i=T}^{L-T} (\Delta SV_i - \overline{\Delta SV})^2} \sqrt{\sum_{i=T}^{L-T} (\Delta SV_{ci} - \overline{\Delta SV_c})^2}} \quad (20)$$

和绝对相对误差比  $R_e$ :

$$R_e = \frac{\sum_{i=T}^{L-T} |(\Delta SV_i - \Delta SV_{ci})|}{\sum_{i=T}^{L-T} \Delta SV_i} \quad (21)$$

式中:  $\Delta SV_i, \Delta SV_{ci}$  分别为由观测资料和变异模型计算的泥沙变异值;  $\overline{\Delta SV}, \overline{\Delta SV_c}$  分别为由观测资料和变异模型计算的泥沙变异均值。

### 2.3 变异模型结构合理性与模拟有效性分析

2.3.1 模型计算结果 变异模型计算, 首先要确定气候周期  $T$ 。气候变化主要受太阳活动周期影响, 太阳活动周期与太阳黑子爆发密切相关, 据研究太阳黑子具有 11.2 a 的周期, 所以这里选择滑动平均周期  $T$  为 11。7 个断面流域用最小二乘法确定的参数详见表 2, 变异模型计算的结果和精度统计详见表 3~4 及图 1~2。表 2 中  $SB$  和  $SB_c$  是泥沙的观测与模型

计算向后滑动平均量,  $SF$  和  $SF_c$  是泥沙的观测与模型计算向前滑动平均量,  $e$  是计算量的相对误差, 下标  $s$  和  $q$  分别表示输沙率和流量, 如  $DC_s$  和  $DC_q$  分别表示输沙率和流量模拟有效系数等。表 2 中植被覆盖率  $C$  为面积比例。用于分析植被变化的遥感数据为 GIMMS NDVI 和 SPOT VGT NDVI 两种数据集, 其中 GIMMS NDVI 数据来自于寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>) 提供的 NOAA/AVHRR NDVI 半月合成数据集, 空间分辨率为  $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ , 时间跨度为 1984 年 1 月至 2006 年 12 月。信息的详细提取过程参考文献[27]。根据这些数据确定了植被覆盖率和水面比例的年变化函数

$$C = 0.394e^{0.0097(YN-1983)} \quad (22)$$

式中:  $YN$  为年份。据这两个公式可计算得植被覆盖率  $C$  的年变化, 进而计算出相应的变异值等。

这次模型计算中, 由于水利工程的年变化信息和流域面平均蒸发资料难以获得, 并为了简化模型检验, 先不考虑蒸发和水利工程影响。简化的模型为

$$\Delta SV = b_q \frac{SV}{QV} \Delta QV + b_c \frac{SV}{CV} \Delta CV \quad (23)$$

$$\Delta QV = c_p \frac{QV}{PV} \Delta PV + c_c \frac{QV}{CV} \Delta CV \quad (24)$$

表 2 黄河中上游流域水沙变异关系模型参数值

流域	$b_q$	$b_c$	$c_p$	$c_c$
温家川	1.55	-0.56	2.82	-1.83
津河	1.80	-0.81	4.24	-3.25
头道拐	1.82	-0.83	2.43	-1.44
龙门	1.24	-0.26	2.43	-1.44
潼关	1.19	-0.20	2.40	-1.41
丁家沟	2.75	-1.76	2.01	-1.02
吴堡	1.59	-0.61	2.29	-1.30

注:  $b_q, b_c, c_p, c_c$  为公式(16)~(17)中的变异模型参数。

表 3 温家川站泥沙变异计算结果

年份	$SB/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	$SB_c/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	$e^{(1)}$	$SF/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	$SF_c/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	$e^{(1)}$
1970	1 322.2	1 364.8	-0.04	1 124.8	1 083.8	0.03
1971	1 486.5	1 469.4	0.01	992.4	1 011.0	-0.02
1972	1 251.8	1 226.5	0.02	943.7	970.4	-0.03
1973	1 257.6	1 288	-0.03	987.5	958.6	0.02
1974	1 261.5	1 298.6	-0.03	1 077.4	1 041.8	0.03
1975	1 194.6	1 211.2	-0.02	1 057.4	1 042.3	0.01
1976	1 451.2	1 345.8	0.07	826.3	933.1	-0.13
1977	1 302.7	1 252.0	0.03	817.0	869.1	-0.07
1978	1 211.9	1 170.7	0.03	770.4	812.8	-0.06
1979	1 284.3	1 239.7	0.03	645.5	691.3	-0.08
1980	1 238.7	1 238.0	0	714.3	716.2	-0.01
1981	1 124.8	1 148.7	-0.03	757.4	734.7	0.03
1982	992.4	1 041.9	-0.05	722.1	673.6	0.06
1983	943.7	1 040.4	-0.11	823.2	727.7	0.11
1984	987.5	1 037.9	-0.06	794.6	745.3	0.06
1985	1 077.4	1 118.9	-0.04	775.4	735.0	0.05
1986	1 057.4	1 112.1	-0.06	778.3	724.7	0.06
1987	826.3	930.6	-0.13	782.5	679.1	0.13
1988	817.0	925.2	-0.14	669.6	562.3	0.16
1989	770.4	855.6	-0.12	592.1	507.8	0.14
1990	645.5	738.2	-0.15	566.0	474.1	0.16
1991	714.3	773.1	-0.09	491.6	433.5	0.11
1992	757.4	782.0	-0.04	392.6	368.8	0.06
1993	722.1	743.5	-0.03	387.1	366.4	0.05
1994	823.2	798.4	0.03	261.6	287.1	-0.1
1995	794.6	792.2	0	221.9	224.9	-0.02
1996	775.4	739.9	0.04	105.3	141.4	-0.35
1997	778.3	743.8	0.04	84.5	119.5	-0.42
1998	782.5	752.4	0.03	50.1	80.7	-0.61
1999	669.6	628.4	0.06	47.2	88.8	-0.89
2000	592.1	547.9	0.07	42.0	86.7	-1.07
2001	566.0	490.9	0.13	36.1	111.6	-2.09
2002	491.6	394.5	0.19	30.1	127.6	-3.24
2003	392.6	291.8	0.25	18.9	120.0	-5.33
2004	387.1	281.8	0.27	12.8	118.3	-8.25

注:  $SB$  和  $SB_c$  是泥沙的观测与模型计算向后滑动平均量;  $SF$  和  $SF_c$  是泥沙的观测与模型计算向前滑动平均量;  $e$  是计算量的相对误差。

表 4 黄河中上游流域泥沙变异模型计算精度

流域	$DC_s$	$RR_s$	$R_{es}$	$DC_q$	$RR_q$	$R_{eq}$
温家川	0.974	0.987	0.069	0.855	0.925	0.097
津河	0.964	0.981	0.169	0.937	0.968	0.085
头道拐	0.981	0.990	0.048	0.849	0.922	0.072
龙门	0.634	0.797	0.234	0.926	0.962	0.047
潼关	0.709	0.843	0.187	0.928	0.963	0.051
丁家沟	0.962	0.980	0.121	0.818	0.905	0.054
吴堡	0.799	0.894	0.210	0.900	0.949	0.063

注:下标  $s$  和  $q$  分别表示输沙率和流量;  $DC$  表示有效性系数;  $RR$  表示相关系数;  $R_e$  表示绝对相对误差比。



图 1 温家川站实际泥沙年变异  $\Delta SV$  与计算泥沙年变异  $\Delta SV_c$  时间过程比较

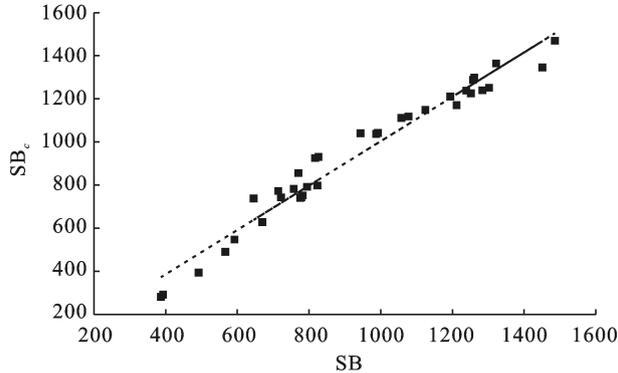


图 2 温家川站实际泥沙年  $SB$  与计算泥沙年  $SB_c$  关系线

2.3.2 模拟结果与分析 表 3 中观测的年输沙率向前滑动平均  $SF$  与向后滑动平均  $SB$  相减得实际输沙年变异  $\Delta SV$ , 类似地计算的年输沙率向前滑动平均  $SF_c$  与向后滑动平均  $SB_c$  相减得计算输沙年变异  $\Delta SV_c$ 。图 1 为窟野河温家川站实际泥沙年变异  $\Delta SV$  与计算泥沙年变异  $\Delta SV_c$  的时间过程比较。从时间系列过程看, 泥沙最大变异发生在 1998 年, 其值为  $-732.4 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{a})$ , 1979 年为其次, 泥沙变异值为  $-638.8 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{a})$ 。从实际泥沙年变异  $\Delta SV$  与计算泥沙年变异  $\Delta SV_c$  时间过程变化趋势看, 两者十分吻合。图 2 是实际泥沙年  $SB$  与计算泥沙年  $SB_c$  关系, 其两者的关系线接近  $45^\circ$  直线, 有效性系数  $DC_s$  为

0.974, 相关系数  $RR_s$  为 0.987, 相对误差只有 6.9%。这些结果都说明微分变异模型的结构是合理的, 可有效地表达泥沙的变异关系。

表 4 是 7 个流域水流和泥沙变异模拟的精度统计。泥沙系列变异模拟的有效性系数最大的流域为 0.981, 最小的也有 0.709, 说明泥沙变异模拟的有效性在这 7 个流域是很高的; 泥沙变异模拟与实际的系列相关系数大于 0.900 的有 4 个, 占到了 57%, 最小的也有 0.797, 说明泥沙年变异  $\Delta SV$  与计算泥沙年变异  $\Delta SV_c$  间的相关性在 7 个流域都是十分显著的; 相对误差最小的为 4.8%, 最大的也只有 23.4%, 模拟误差不同流域不仅都较小且变化不大, 说明变异模型模拟关系很稳定。水流系列变异模拟的精度类似, 这里限于篇幅不展开讨论(表 4)。

2.3.3 流域平均变异贡献比例分析 为了进一步检验微分变异模型结构的合理性, 这里把变异模型用于泥沙变化贡献比例分析。由公式(23)–(24)组成的变异模型, 有如下变异贡献比例分析式:

$$\Delta SV = (b_q C_p + b_p) \frac{SV}{PV} \Delta PV + \dots + (b_q C_c + b_c) \frac{SV}{CV} \Delta CV \quad (25)$$

式中: 前两项之和反映降雨因素改变导致的泥沙变化, 后两项之和是由植被覆盖率变化引起的泥沙变异。则气候因素和植被因素变异引起的贡献比例分别为

$$CH_p = \frac{(b_q C_p + b_p) \frac{SV}{PV} \Delta PV}{\Delta SV} \quad (26)$$

$$CH_c = \frac{(b_q C_c + b_c) \frac{SV}{CV} \Delta CV}{\Delta SV}$$

式中:  $CH_p$ ,  $CH_c$  分别表示气候、植被因素变化引起的泥沙变化贡献比例。具体计算结果详见表 5。从表 5 结果看, 各个流域不同因素贡献比例略有变化, 气候因素变化贡献比例在 0.106~0.155, 植被变化贡献比例在 0.844~0.893, 气候、植被平均贡献比例分别为 0.129 和 0.870, 这与潼关站的贡献比例十分接近, 因

为其他 6 个流域散布在潼关流域内,这全部流域平均与潼关站接近,一方面说明这些流域和相应资料系列的代表性选择合理;第二方面也进一步证明了变异模型结构的合理性和模拟结果的稳定性。

表 5 黄河中上游流域平均变异贡献比例

流域	CH <sub>p</sub>	CH <sub>c</sub>
温家川	0.155	0.844
津河	0.106	0.893
头道拐	0.112	0.887
龙门	0.128	0.871
潼关	0.127	0.872
丁家沟	0.122	0.877
吴堡	0.151	0.848
平均	0.129	0.870

注:CH<sub>p</sub>, CH<sub>c</sub> 分别表示气候、植被因素变化引起的泥沙变化贡献比例。

### 3 结论

本文以微分为基础,提出直接建立泥沙、水流变异模型,通过黄土高原和黄河中上游 7 个测站控制流域输沙率和流量变异变量的模拟检验,获得了 7 个流域输沙率和水流变异模拟平均有效性系数为 0.860 和 0.887,平均相对误差分别为 14.8% 和 6.7%。从水流变异、泥沙变异模拟精度和各因素变异贡献比例 3 个层面检验了模型,初步证明了结构的合理性和模拟实际泥沙变异具有的高有效性。

#### [参 考 文 献]

[1] 赵羽西,谢平,桑燕芳,等.基于相关分析的水文趋势变异分级原理及验证[J].科学通报,2017,62(26):3089-3097.

[2] Wang Shuai, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2017,9(1):38-41.

[3] 穆兴民,巴桑赤烈, Zhang Lu,等.黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J].泥沙研究,2007(2):36-41.

[4] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.

[5] 李文文,傅旭东,吴文强,等.黄河下游水沙突变特征分析[J].水力发电学报,2014,33(1):19-20.

[6] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展,2009,20(2):153-158.

[7] 李海彬,张小峰,胡春宏,等.基于 B-G 分割算法的河川年输沙量突变分析[J].水利学报,2010,39(12):1387-1392.

[8] 曾思栋,张利平,夏军,等.永定河流域水循环特征及其对气候变化的响应[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(3):501-511.

[9] 董李勤,章光新.嫩江流域沼泽湿地景观变化及其水文驱动因素分析[J].水科学进展,2013,24(2):177-183.

[10] 陈利群,刘昌明.黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J].中国环境科学,2007,27(4):559-565.

[11] 刘春葵,占车生,夏军,等.关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J].水利学报,2014,45(4):379-385,393.

[12] 刘艳丽,张建云,王国庆,等.气候自然变异在气候变化对水资源影响评价中的贡献分析(I):基准期的模型与方法[J].水科学进展,2012,23(2):147-155.

[13] 包为民.黄土地区流域水沙模拟概念模型与应用[M].江苏南京:河海大学出版社,1995.

[14] Si Wei, Bao Weimin, Jiang Peng, et al. A semi-physical sediment yield model for estimation of suspended sediment in loess region [J]. 国际泥沙研究(英文版),2017,32(1):12-19.

[15] 赵人俊.流域水文模拟—新安江模型与陕北模型[M].北京:水利电力出版社,1984.

[16] 张敬平,黄强,赵雪花.漳泽水库水文序列突变分析方法比较[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(5):837-844.

[17] Goossens, C, A Berger. How to Recognize an Abrupt Climatic Change? [M]// Springer Netherlands: Abrupt Climatic Change. 1987:448-465.

[18] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia [J]. Global & Planetary Change, 2013,100(1):172-182.

[19] 陈远中,陆宝宏,张育德,等.改进的有序聚类分析法提取时间序列转折点[J].水文,2011,31(1):41-44.

[20] Kisi O, Ay M. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey [J]. Journal of Hydrology, 2014,513(5):362-375.

[21] 刘群群,何文平,顾斌.非线性动力学方法在气候突变检测中的应用[J].物理学报,2015,64(17):179201-179201.

[22] 李宁,姜翠玲.农田土壤流失对三沙湾水环境的影响研究[C].江苏南京:中国水论坛,2007.

[23] Chalov S R, Tsypelenkov A S, Pietron J, et al. Sediment transport in headwaters of a volcanic catchment—Kamchatka Peninsula case study [J]. Frontiers of Earth Science, 2017, 11(3): 565-578.

[24] 唐丽霞,张志强,王新杰,等.黄土高原清水河流域土地利用/覆盖和降雨变化对侵蚀产沙的影响[J].自然资源学报,2010,25(8):1340-1349.

[25] 龙天渝,李继承,刘腊美.嘉陵江流域吸附态非点源污染负荷研究[J].环境科学,2008,29(7):1811-1817.

[26] 谢云,林燕,张岩.通用土壤流失方程的发展与应用 [J].地理科学进展,2003,22(3):279-287.

[27] 王童,何海,吴志勇.近 30 年来窟野河流域土地利用与植被覆盖度变化分析[J].水电能源科学,2017,35(11):127-130.