

黄河(内蒙古段)水沙运动过程特征及演变趋势

李超¹, 全栋¹, 张岩², 史小红¹, 郭子扬¹

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;2.河南省水土保持监测总站,郑州 450008)

摘要:近年来受上游水库、河道控导工程和气候变化等因素影响,黄河(内蒙古段)呈现水沙异源、水少沙多的特性,导致河道萎缩和泥沙淤积严重,河道形态演变剧烈,严重威胁夏汛及凌汛行洪安全,也对河道及两岸的生态环境造成严重影响。选取黄河(内蒙古段)干流入境石嘴山水文站和出境头道拐水文站水沙过程为研究对象,分别采用频谱分析法、R/S 极差分析法和 Markov 链分析法系统研究 2009—2016 年两站逐月水沙运动变化的时序、运动状态和演变特征,讨论影响水沙运动变化过程的关键因素。结果表明:石嘴山站和头道拐站输沙量的变化周期均为 1 年,而径流的变化周期分别为 1 年和 6 个月;石嘴山和头道拐站径流 Hurst 指数值分别为 0.576 和 0.515,输沙量 Hurst 指数分别为 0.519 和 0.249;黄河(内蒙古段)丰水低沙和枯水高沙概率之和约为 50%;水沙运动演化过程中,丰水高沙与枯水低沙极限概率之和大于 0.8。受期间特殊的来水来沙过程、水文气候特征及人类活动的影响,黄河(内蒙古段)水沙运动时序特征呈现非同步性和不协调性,未来水沙运动过程趋势逐渐向协调演变。

关键词:黄河(内蒙古段);水沙运动;演变趋势;水沙异源;Markov 模型

中图分类号:TV882.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0041-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.006

Runoff and Sediment Transport Process Characteristics and Evolution Trend of the Yellow River Inner Mongolia Reach

LI Chao¹, QUAN Dong¹, ZHANG Yan², SHI Xiaohong¹, GUO Ziyang¹

(1.College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2.Soil and Water Conservation Monitoring Station of Henan Province, Zhengzhou 450008)

Abstract: Due to the impact of upstream reservoir, control project and climate change, the Yellow River Inner Mongolia reach has the characteristics of different sources of runoff and sediment, less water and more sediment. This phenomenon leads to sediment deposits, sharply decline and morphological evolution violently. This is seriously threatening the safety and ecological environment during summer flood and ice flood period. Shizuishan and Toudaoguai hydrologic station runoff and sediment transport process were chosen to analysis water-sediment time-order character, motion state and evolution characteristics by using spectral analysis method, R/S range analysis method and Markov method from 2009 to 2016. The results showed that the sediment transport variation period was one year at Shizuishan and Toudaoguai hydrologic station, but runoff variation period was one year and six months for the two stations respectively. Runoff Hurst number was 0.576 and 0.515, and sediment transport Hurst number was 0.519 and 0.249 respectively at Shizuishan and Toudaoguai hydrologic station. The probability of abundant flow low sediment and less discharge high sand was about 50%, the sum of the limit probability of large discharge high sediment and water shortage low sediment transport was greater than 0.8. There were asynchronization and incongruity of runoff and sediment time-order characters by the effect of incoming runoff and sediment process, hydroclimatic characteristics, human activities. Runoff and sediment transport process will be gradually coordinated in the future.

Keywords: Yellow River Inner Mongolia reach; runoff and sediment transport process; evolution trend; different sources of water and sediment; Markov model

收稿日期:2019-07-05

资助项目:国家自然科学基金项目(51669024,51669022)

第一作者:李超(1983—),男,副教授,博士,主要从事泥沙运动力学及河流动力学研究。E-mail:nmndlc@imau.edu.cn

通信作者:全栋(1992—),男,讲师,主要从事泥沙运动力学研究。E-mail:13644769625@163.com

黄河是世界上著名的高含沙量河流,其河床泥沙冲淤过程及河道演变是影响黄河行洪能力与安全的关键。近 20 年来,黄河(内蒙古段)部分河段淤高了近 2 m,形成了 200 余公里的地上“悬河”,河床抬升、河道萎缩及频繁摆动已成为威胁沿黄两岸安全的重要隐患^[1]。尤其近 10 年来自然条件变化与人类活动的双重影响,内蒙古河段的水文气候特征、河道形态及流域地质地貌状况发生一定的变化,导致河道内水沙过程、影响因素及输移特征等也发生了改变,很多学者开展了黄河(内蒙古段)泥沙输移特征、影响因素及数学模型等方面的研究。王彦军等^[2]依据黄河(内蒙古段)1952—2010 年实测水沙资料,基于多沙河流的经验输沙公式,建立了全河段汛期和非汛期冲淤量计算公式,较好地模拟了黄河(内蒙古段)河道淤积发展过程;冉大川等^[3]依据头道拐站 1950—2010 年水沙实测资料,基于数理统计分析,定量评估了多因子对头道拐河段水沙变化的贡献水平,指出下垫面条件、水库调度及水土保持综合治理等因子是水沙变化的主要影响因子;张翔等^[4]通过对黄河(内蒙古段)主要沙源“十大孔兑”之一东柳沟沉积泥沙粒径空间分布与特征的研究,表明东柳沟的侵蚀过程在空间上表现为水力侵蚀和风力侵蚀作用的交替叠加,其中沉积泥沙中值粒径变化最剧烈的地方是风蚀和水蚀交错最为频繁的区域;师长兴等^[5]通过对头道拐站 1950—2009 年水沙系列进行突变检验,确定黄河(内蒙古段)水沙变化存在 1969 年、1986 年和 1996 年 3 个突变点,结合水沙数据分析得出第 1 个突变为泥沙显著减少,第 2 个突变表现为水量和泥沙同时减少,第 3 个突变为水量进一步减少。从以上研究可以看出,关于黄河(内蒙古段)水沙运动过程的年际变化特征、状态特征、水沙异源的原因和影响因素以及水沙运动过程的演变趋势等系统性分析鲜有研究。

本文以黄河(内蒙古段)干流入境石嘴山水文站和出境头道拐水文站为研究对象,基于 2009—2016 年水沙数据资料,采用频谱分析、R/S 极差分析、概率统计分析等方法系统分析了黄河(内蒙古段)水沙运动时序特征和状态特征,并讨论水沙运动过程的影响因素,同时基于 Markov 链分析模型对黄河(内蒙古段)水沙过程的演变趋势进行分析,旨在揭示黄河(内蒙古段)水沙运动变化规律,为黄河泥沙治理提供一定的理论支撑。

1 区域概况及研究方法

1.1 研究区概况

黄河(内蒙古段,图 1)地处黄河流域最北端,北起蒙古高原,南至长城,西邻宁夏,东滨海河流域,自宁夏石嘴山入境,至鄂尔多斯市准格尔旗出境,全长约 840 km,占黄河干流总长度的 15.74%,多年平均

天然年径流量为 335.9 亿 m^3 。研究区地处黄河上游二级阶地,弯多流缓、河道比降小、水流挟沙能力弱、淤积严重,河道内多年平均悬移质输沙量 1.5 亿 t。研究区气候类型为中温带大陆型干旱、半干旱季风气候,区域降水量小、蒸发量大,气温和降水量季节性变化特征显著。黄河(内蒙古段)由上、下游的峡谷型河段和中游的平原型河段组成,上游的峡谷型河段是从石嘴山至乌达公路桥,该段黄河穿行于贺兰山与卓资山之间,长度约 30 km,落差约 18 m,河道比降 0.6‰;下游峡谷区自河口镇至山西河曲,位于黄河(内蒙古段)的尾部,习惯称为黄河托龙段,长度约 100 km,落差约 130 m,河道比降 1.3‰;巴彦高勒至头道拐河段河宽坡缓,逶迤曲折,河道总长 521 km,落差约为 64 m,该河段平均比降约为 0.13‰,其间支流主要有南岸的“十大孔兑”和北岸的昆都仑河、五当沟等,支流域内植被差、土质胶结能力弱,河道流程短、比降大、水流急、含沙量高,汛期发生暴雨洪水时极易造成水土流失^[6-7]。

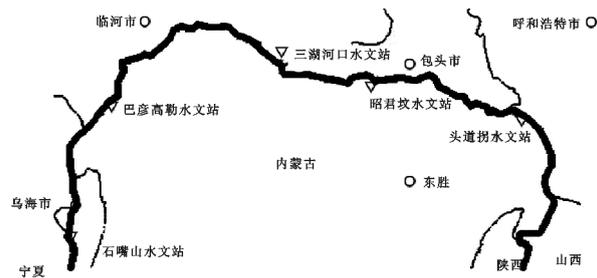


图 1 研究区位置

1.2 研究方法

1.2.1 频谱分析法 黄河(内蒙古段)径流和输沙量的周期性变化特征采用频谱分析法研究。频谱分析法是重要的时间序列分析方法,通过快速 Fourier 变换即可对时间序列进行功率谱分析,研究其周期特征^[8-10]。假定将时间序列 x_t 展开为 Fourier 级数,计算公式为:

$$x_t = \sum_{i=1}^k (a_i \cos 2\pi f_i t + b_i \sin 2\pi f_i t) \quad (1)$$

式中: f_i 为频率; t 为时间序号; k 为周期分量的个数即主周期(基波)及其谐波的个数; ε_t 为残差(白噪声序列)。当频率 f_i 给定时,公式(1)可被视为多元线性回归模型。借助多元回归分析理论可以证明,当 $i \neq N/2$ 时,待定系数 a_i 和 b_i 的最小二乘估计计算公式为:

$$\hat{a}_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N x_t \cos 2\pi f_i t \quad (2)$$

$$\hat{b}_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N x_t \sin 2\pi f_i t \quad (3)$$

式中: N 为观测个数,则时间序列的周期图计算公式为:

$$I(f_i) = \frac{N}{2} (a_i^2 + b_i^2) \quad (4)$$

式中: $I(f_i)$ 为频率 f_i 处的强度 ($i = 0, 1, 2, \dots, N-1$)。则 $\frac{I(f_i)}{2}$ 即为谱密度。以 f_i 为横轴, 以 $I(f_i)$ 为纵轴, 绘制时间序列的周期图, 可以在最大值处确定时间序列的周期。

1.2.2 R/S 极差分析 黄河(内蒙古段)径流和输沙量的变化趋势采用 R/S 极差分析法进行分析, 通过 Hurst 指数 H ($0 < H < 1$) 对时间序列变化趋势进行判断分析。当 $H = 0.5$ 时, 说明时间序列是完全独立的随机过程; 当 $H < 0.5$ 时, 表明未来变化状况与过去变化相反, 即反持续性, H 越小, 反持续性越强; 当 $H > 0.5$ 时, 表明未来变化状况与过去变化一致, 即有持续性, H 越接近 1, 持续性越强^[11-12]。R/S 极差分析法原理为: 对于一个时间序列 $k(t)$, $t = 1, 2, 3, \dots, t$, 当任意正整数 $1 \leq t \leq n$, 计算各参数公式为:

$$\text{均值: } k_n = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n k(t) \quad (5)$$

$$\text{累积离差: } X(t, n) = \sum_{i=1}^t (k(i) - k_n) \quad (6)$$

$$\text{极差: } R_n = \max X(t, n) - \min X(t, n) \quad (7)$$

$$\text{标准差: } S(n) = \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (k(t) - k_n)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中: n 为时间序列样本容量; t 为时序。

1.2.3 Markov 链分析 黄河(内蒙古段)径流和输沙演变过程采用马尔科夫分析法, 从实测径流与输沙量的时间序列中抽象出随机过程的概率分布, 通过概率分布规律揭示水沙运动的演变过程, 进而阐明水沙变化过程产生和发展的机制。Markov 链是一种状态转移分析技术, 根据事物的一种状态向另一种状态转化的概率分析未来的状态概率分布^[13-14]。设马尔科夫链状态为 X_n ($n = 0, 1, 2, \dots, n$), 其每一时刻的状态概率计算公式为:

$$a_i(n) = P(X_n = i) \quad (9)$$

式中: i 为马尔科夫链中一种状态, 且 $\sum_{i=1}^k a_i(n) = 1$ 。则马尔科夫链由状态 i 转移至状态 j 的转移概率 P_{ij} 与状态概率的基本方程为:

$$P_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \quad (10)$$

$$a_i(n+1) = \sum_{j=1}^k a_j(n) P_{ij} \quad (11)$$

式中: $P_{ij} \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^k P_{ij} = 1$ 。一般地, 转移概率存在极限, 且极值不依赖于 i , 极限概率计算公式为:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{ij}(n) = \pi_j \quad (12)$$

2 结果与分析

2.1 水沙运动变化时序特征

通过对 2009—2016 年间石嘴山站和头道拐站逐月的径流和输沙量进行 Fourier 变换, 计算各站径流

和输沙量分别在相应频率下所对应的谱密度值并绘制频谱图, 频率变化范围为 $0 \sim 1$, 根据其对称性, 只需绘制 $1/2$ 即可确定其周期特征。因此, 以对称点频率值 0.5 为界绘制频谱图, 并在频谱图尖峰最大点处找到相应的变化周期。由图 2 可知, 石嘴山站径流和输沙量谱密度最大值所对应的频率均为 0.086 , 即径流和输沙量的变化周期均为 11.62 月, 周期变化约为 1 年。同样, 由图 3 可知, 头道拐站径流谱密度最大值所对应的频率为 0.172 , 即径流的变化周期为 5.81 月, 周期变化约为 6 个月; 其输沙量谱密度最大值所对应的频率为 0.078 , 则输沙量的变化周期为 12.82 月, 周期变化约为 1 年。

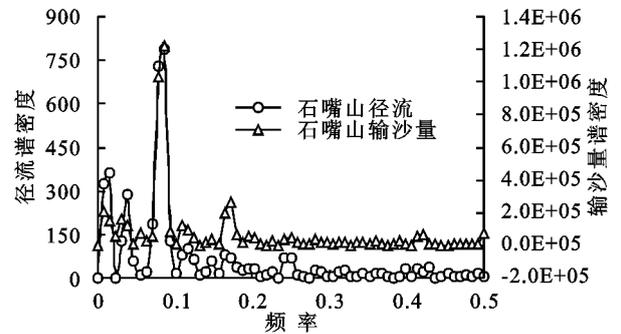


图 2 石嘴山水文站径流、输沙量频谱图

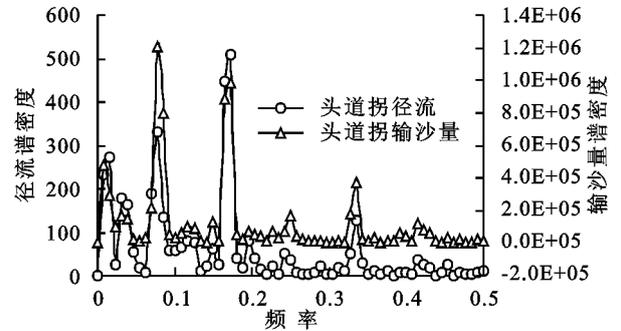


图 3 头道拐水文站径流、输沙量频谱图

对计算的周期结果进行检验, 选取石嘴山站径流计算其 F 检验的统计量为 0.1548 , 取显著性水平 α 为 0.05 , 周期序号 r 为 1 , 查调和分析的 F 统计表可知 $g_\alpha(s, r) = g_{0.05}(50, 1) = 0.1313$, 而对本次检验样本 s 为 64 , 有 $g_{0.05}(64, 1) < g_{0.05}(50, 1)$, 因此必有 $g_1 > g_{0.05}(64, 1)$, 检验通过, 周期合理。依次验证所求径流和输沙量周期均通过检验。根据径流和输沙量的变化周期可知, 石嘴山站径流和输沙量的变化周期一致, 说明黄河干流在进入黄河(内蒙古段)之前表现为水沙变化相协调特性; 而头道拐站的径流和输沙量变化的周期具有不一致性, 说明黄河干流在黄河(内蒙古段)内表现为水沙运动不协调性, 河道属于非平衡输沙, 来沙量和水流挟沙能力的不协调性易引起河道的冲淤变化^[15]。

分别对 2009—2016 年石嘴山站和头道拐站逐月的径流和输沙量进行极差分析, 采用最小二乘法拟合 $\ln n$ 和 $\ln R/S$, 所得拟合直线方程中幂指数即为

Hurst 指数值。由图 4 可知,石嘴山站和头道拐站输沙量的 Hurst 指数值分别为 0.519 和 0.249,石嘴山站输沙量的 Hurst 指数值大于 0.5,表明石嘴山站输沙量的时间差分序列前后变化呈正相关,且输沙量的时间序列具有持续性,表现为输沙量未来变化趋势与现在变化趋势一致。而头道拐站输沙量的 Hurst 指数值小于 0.5,表明头道拐站输沙量的时间差分序列前后变化呈负相关,且输沙量的时间序列具有反持续性,表现为输沙量未来变化趋势与现在变化趋势相反。由图 5 可知,石嘴山和头道拐站径流的 Hurst 指数值为分别为 0.576 和 0.515,均大于 0.5,表明两站径流的时间差分序列前后变化呈正相关,且径流的时间序列具有持续性,表现为径流未来变化趋势与现在变化趋势一致。

通过对石嘴山站和头道拐站径流与输沙量的 Hurst 指数值分析可知,未来石嘴山站的径流和输沙量变化趋势与过去呈现一致性特征,说明黄河干流在进入黄河(内蒙古段)之前呈现为径流和输沙量变化过程的同步性,即径流变化对输沙量变化起重要影响。头道拐站径流在未来变化趋势呈现与过去相一致特征,而输沙量在未来变化趋势却呈现与过去相反特征,说明黄河干流流经黄河(内蒙古段)之后呈现为径流和输沙量变化过程的非同步性,表现出明显的水沙异源特征,造成河段内水沙空间分布不合理。

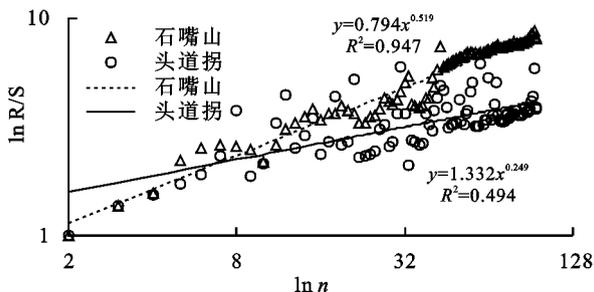


图 4 石嘴山和头道拐水文站输沙量趋势性特征曲线

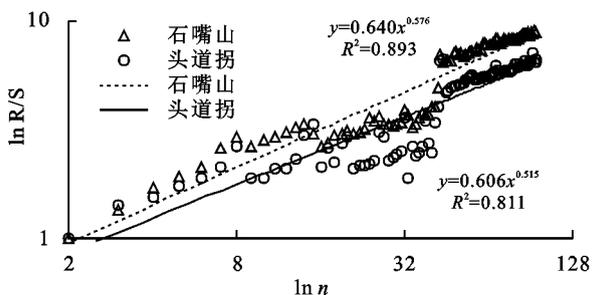


图 5 石嘴山和头道拐水文站径流趋势性特征曲线

2.2 水沙运动变化状态特征

由于黄河(内蒙古段)流域内地质地貌条件、水文气候特征和人类活动变化的多样性、复杂性和变异性,加之径流和输沙量变化过程的不确定性,导致在机理上分析水沙变化过程存在一定难度。因此,通过分析石嘴山站和头道拐站河道径流与输沙量逐月的变化过

程确定出径流丰枯水平和输沙量高低等级,以河道径流丰枯水平、输沙量的高低等级以及径流的丰枯概率和输沙量的高低概率为指标,划分黄河(内蒙古段)水沙运动状态,进而研究其水沙运动变化过程的演变趋势^[16]。石嘴山站和头道拐站月平均径流分别为 20.42,15.12 亿 m^3 ,变差系数为 0.461 和 0.588,以逐月平均径流值作为标准,将河道径流状态划分为 4 个等级:

$$\text{丰水级: } I > I_0 + \sigma, \quad \text{偏丰级: } I_0 < I \leq I_0 + \sigma$$

$$\text{偏枯级: } I_0 - \sigma < I \leq I_0, \quad \text{枯水级: } I \leq |I_0 - \sigma|$$

同理,石嘴山站和头道拐站月平均输沙量分别为 365.98,371.13 万 t,变差系数分别为 0.864 和 1.084,现以逐月平均输沙量值作为标准,将河道输沙状态也划分为 4 个等级:

$$\text{高沙级: } S > S_0 + \sigma, \quad \text{偏高级: } S_0 < S \leq S_0 + \sigma$$

$$\text{偏低级: } S_0 - \sigma < S \leq S_0, \quad \text{低沙级: } S \leq |S_0 - \sigma|$$

式中: I 为径流量(亿 m^3); I_0 为径流系列均值(亿 m^3); S 为输沙量(万 t); S_0 为输沙量系列均值(万 t); σ 分别为径流系列和输沙量系列的标准差。

按照分级原则计算石嘴山站和头道拐站 2009—2016 年逐月径流时间序列的丰枯概率和输沙量时间序列的高低概率。由表 1 和表 2 可知,石嘴山站和头道拐站径流和输沙量多年变化呈现枯水状态和低输沙状态概率明显。石嘴山站丰水概率大于高输沙概率,枯水概率小于低输沙概率,表明石嘴山站大径流条件下高输沙量和小径流条件下低输沙量水平较低;而头道拐站径流丰枯概率和输沙量高低概率相一致,表明头道拐站大径流条件下高输沙量和小径流条件下低输沙量在多年变化中呈现一致状态。因此,可知黄河(内蒙古段)水沙运动变化过程仍然呈现不协调的特征。

表 1 径流丰枯概率 单位:%

水文站	丰水	偏丰	小计	偏枯	枯水	小计
石嘴山	10.42	31.24	41.66	55.21	3.13	58.34
头道拐	14.58	18.75	33.33	65.63	1.04	66.67

表 2 输沙量高低概率 单位:%

水文站	高沙	偏高	小计	偏低	低沙	小计
石嘴山	15.63	22.92	38.55	52.08	9.37	61.45
头道拐	16.67	16.67	33.34	61.46	5.20	66.66

由上述水沙概率分析可知,石嘴山站和头道拐站水沙运动变化关系具体表现为丰水高沙、丰水低沙、枯水高沙和枯水低沙 4 种状态,其中丰水高沙和枯水低沙状态表现为水沙运动协调,而丰水低沙和枯水高沙状态表现为水沙运动不协调。根据 2009—2016 年 2 个站逐月径流和输沙量数据统计的径流丰枯概率和输沙量高低概率,计算 2 个站水沙运动变化 4 种状态的概率。由表 3 可知,石嘴山站和头道拐站水沙运动表现为协调状态的概率分别为 51.9% 和 55.5%,即在多年变

化过程中黄河(内蒙古段)水沙运动表现为协调状态的概率仅占 50%左右,河段内水沙运动不协调特征明显,水沙输移能力不相匹配的矛盾性仍然显著。

表 3 水沙运动状态概率 单位:%

水文站	协调		不协调		合计
	丰水高沙	枯水低沙	丰水低沙	枯水高沙	
石嘴山	16.1	35.8	25.6	22.5	100
头道拐	11.1	44.4	22.2	22.3	100

2.3 水沙运动过程演变特征

通过对黄河(内蒙古段)水沙运动状态的划分,统计石嘴山站与头道拐站在 2009—2016 年间各月的水沙运动状态,并计算 4 种水沙运动状态间的转移概率,其中 1,2,3,4 分别表示丰水高沙、丰水低沙、枯水高沙和枯水低沙 4 种水沙运动状态。由表 4 可知,石嘴山站与头道拐站水沙运动状态 2 与状态 3 之间的转移概率极小,近乎于 0,即黄河(内蒙古段)水沙运动演变过程几乎不存在丰水低沙与枯水高沙之间的直接转移,说明水沙运动演变过程不易出现径流与输沙量同时向相反状态演变,水沙运动不协调仅表现为丰水低沙或枯水高沙中的一种特征,并且水沙不协调状态难以持续;而两站水沙运动状态由状态 1 转移至状态 3 或由状态 4 转移至状态 2 的概率较高,均大于 0.6,即黄河(内蒙古段)水沙运动演变过程主要为由丰水高沙转移至枯水高沙或由枯水低沙转移至丰水低沙,说明水沙运动变化是一个逐渐演变的过程,在河道内径流变化的条件下易引起水沙运动呈现不协调的特征。

表 4 石嘴山和头道拐水文站各状态转移概率

水文站	状态	1	2	3	4
石嘴山	1	0.645	0.129	0.065	0.161
	2	0.111	0.111	0.111	0.667
	3	0.667	0	0	0.333
	4	0.122	0.082	0.061	0.735
头道拐	1	0.536	0.036	0.036	0.393
	2	0.250	0	0	0.750
	3	0.750	0	0	0.250
	4	0.153	0.051	0.051	0.746

根据计算所得石嘴山站与头道拐站转移概率,构造相应的转移概率矩阵,进行 Markov 链分析求解 4 种水沙状态的极限概率。由图 6 可知,石嘴山站与头道拐站丰水高沙与枯水低沙状态极限概率之和分别为 0.842 和 0.911,明显高于丰水低沙与枯水高沙极限概率之和,即水沙运动协调状态概率高于水沙运动不协调状态概率,说明黄河(内蒙古段)水沙演变过程在未来是向着水沙运动协调的趋势演变。分别绘制 2009—2016 年石嘴山站和头道拐站径流和输沙量的逐月双累积曲线。由图 7 可知,石嘴山站与头道拐站双累积曲线相关性较高,且输沙量累积值随径流累积

值增加而逐渐增大并趋于稳定,说明水沙运动多年变化逐渐呈现出协调变化趋势。

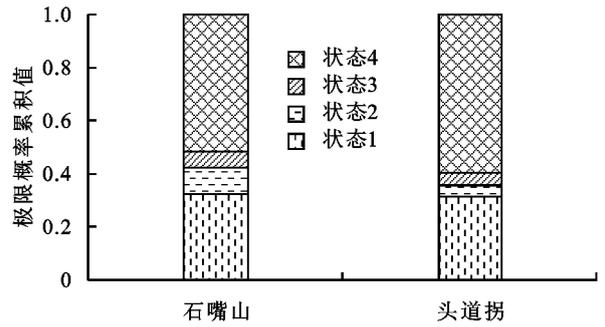


图 6 水沙状态极限概率累积

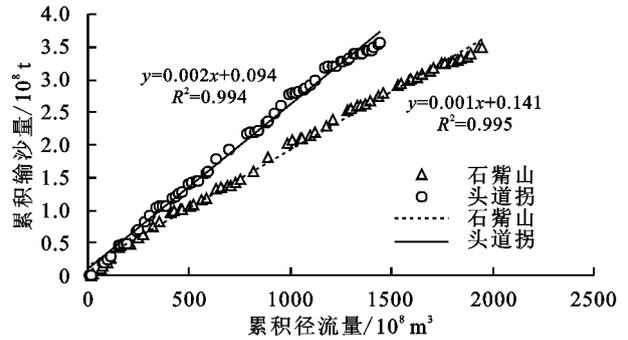


图 7 水沙关系双累积曲线

3 讨论

3.1 流域产沙及风沙入黄

黄河(内蒙古段)径流和输沙量变化呈现一定的趋势性,同时也具有一定的周期性变化特征,通过周期性和趋势性分析可知黄河(内蒙古段)水沙运动时序特征呈现不协调性和变化的非同步性。其主要原因因为黄河(内蒙古段)具有水沙异源的特性。黄河干流在内蒙古河段内汇入的径流极少,其径流主要来源于黄河上游河段来水,而上游龙羊峡、刘家峡、青铜峡、八盘峡和三盛公累积淤积泥沙 20 亿 t,使得干流来沙减少,该河段泥沙主要来自黄河(内蒙古段)流域内支流洪水来沙及风沙入黄^[17]。

黄河(内蒙古段)流域紧邻黄土高原,流域内有昆都仑河、“十大孔兑”及山洪沟汇入,山洪沟及孔兑的周边植被稀疏、土壤质地疏松、胶结能力弱,沟壑纵横且河道的比降较大,流域内干旱少雨的气候特征使得降雨主要以暴雨形式出现,暴雨产生峰高量小、陡涨陡落的高含沙量洪水导致在汛期内河道水土流失来沙量占年来沙量的 98%,甚至 1 次洪水来沙量占年来沙量的 35%^[18]。其上游有腾格里沙漠及河东沙地,同时沿黄两岸分布有乌兰布和沙漠及库布齐沙漠,使得内蒙古河段属于典型的沙漠河流,据计算风沙的作用下 2013—2016 年乌兰布和沙漠风沙入黄量为 53.78~158.92 万 t/a,与 1990—2013 年风沙入黄量 374.80 万 t/a 相比明显减小,并且呈现逐渐降低的变

化趋势^[19];有研究^[20]表明,乌兰布和沙漠区域内吉兰太和阿拉善左旗气象站多年平均风速和极大风速均由 3 m/s 下降至 2 m/s,而多年间降水量并无明显变化,使得风沙入黄量也持续降低。因此,流域产沙作用和风沙入黄量的变化对黄河(内蒙古段)水沙运动变化过程产生着重要的影响。

3.2 水文气候特征

黄河(内蒙古段)地处西北内陆黄河上游中纬度地区,海拔相对较高,南有秦岭、西南有喜马拉雅山脉阻隔,受暖湿气流影响较弱,多受厄尔尼诺循环、北大西洋洋流及季风影响,复杂多变的气候条件对流域水文特征产生重要影响^[21]。水文气候变化具有明显的时空多尺度性,据研究^[22-23]可知,黄河(内蒙古段)流域内降水量存在 3,6,11 年变化周期,而河道输沙与流域降水量存在一定的响应关系,降水量的周期性变化对输沙过程产生着重要的影响作用。统计 2009—2016 年头道拐站降水量与年输沙量之间关系,由图 8 可知,降水量依时序呈现递增变化趋势,而输沙量变化呈现下降趋势;降水量偏丰状态使得流域产汇流增加,相应河道径流量也增加,而在较大径流条件下输沙量却仍然处于不断减小趋势,既表明内蒙古河段水沙运动不协调,也说明流域内下垫面条件对于减沙的作用越来越明显,降水量对于增沙的作用越来越弱。

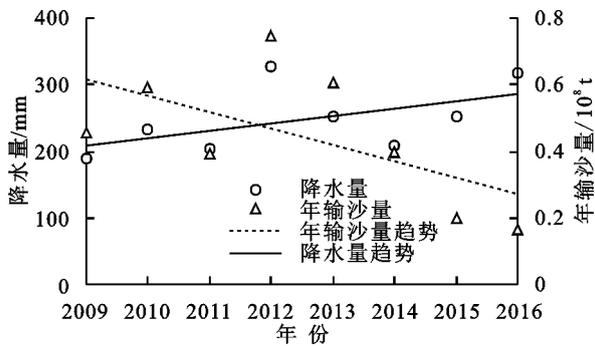


图 8 头道拐水文站降水与年输沙量关系

3.3 人类活动

黄河(内蒙古段)水沙运动特征与流域内强烈的人类活动有着密切联系,影响水沙运动特征的主要人类活动有沿黄工、农业取耗水、河道内及沿黄水利枢纽修建、流域内水土保持措施实施。黄河(内蒙古段)流域内水土保持措施的实施,水利枢纽的修建以及沿黄工、农业取用水量的不断增加,对黄河干流径流和输沙量均产生重要影响,河段在 1969—1986 年和 1987—2010 年时段年平均引水量分别为 123.8、142.5 亿 m^3 ,时段内年均引沙量分别为 0.324、0.443 亿 t,引水引沙量持续增加导致河段内输沙量的降低^[24];自 1989—2015 年“十大孔兑”流域未利用土地面积减少了 9.84%,耕地减少了 2.12%,而林草地增加了 9.39%,退耕还林、还草工程的有效实施增加了流域内的植被覆盖度,同

时也增强了流域内的水土保持能力,使得流域产沙能力变弱,进而导致河段来沙量减少^[25];水土保持综合治理工程和重点小流域治理工程的实施,使得“十大孔兑”水土保持面积自 2004—2015 年累计增加 149 996.2 hm^2 ,有效降低了水土流失进入黄河干流的泥沙数量,对流域内水产沙过程产生了重要的影响^[26]。总之,随着经济社会的发展,人类活动对黄河(内蒙古段)水沙运动过程呈现出越来越重要的影响。

4 结论

(1)通过对黄河(内蒙古段)水沙运动时序特征分析可知,水沙运动的周期性不同和趋势性变化不一致表明黄河(内蒙古段)水沙运动时序特征呈现出非同步性和不协调性;统计分析确定黄河(内蒙古段)具有丰水高沙、丰水低沙、枯水高沙和枯水低沙 4 种状态,其中丰水低沙和枯水高沙概率之和约为 50%,说明水沙运动过程具有显著地不协调性特征。

(2)黄河(内蒙古段)水沙运动不协调性仅表现为丰水低沙或枯水高沙中的一种特征,水沙运动演变过程主要为丰水高沙转移至枯水高沙或枯水低沙转移至丰水低沙,是一个逐渐演变的过程,河道径流变化易引起水沙运动不协调,且丰水高沙与枯水低沙极限概率之和大于 0.8,水沙运动过程在未来是向着水沙运动协调的趋势演变。

(3)黄河(内蒙古段)径流主要来自于上游干流,泥沙主要来自流域内支流洪水来沙及风沙入黄,因此流域内水沙异源特性引起水沙运动过程不协调,此外复杂多变的水文气候特征及日益增加的人类活动也是水沙运动过程呈现不协调特征的重要影响因素。

参考文献:

- [1] 马睿,马良,张罗号,等.黄河流域典型沙质河段冲淤量预估方法及应用[J].水利学报,2016,47(10):1277-1286.
- [2] 王彦军,吴保生,王永强,等.黄河内蒙古河段非汛期和汛期冲淤量计算方法[J].地理学报,2015,70(7):1137-1148.
- [3] 冉大川,姚文艺,申震洲,等.黄河头道拐水沙变化多元驱动因子贡献率分析[J].水科学进展,2015,26(6):769-778.
- [4] 张翔,李鹏,张洋,等.东柳沟沉积泥沙粒径空间分布与特征[J].水土保持学报,2015,29(1):75-79.
- [5] 师长兴,邵文伟,范小黎,等.黄河内蒙古段洪峰特征及水沙关系的变化[J].地理科学进展,2012,31(9):1124-1132.
- [6] 汪岗,范昭.黄河水沙变化研究[M].(2卷)郑州:黄河水利出版社,2002.
- [7] 李畅游,李超.黄河内蒙古段河冰生消演变特性及数值模拟技术[M].北京:科学出版社,2018:9-14.
- [8] 彭俊杰,魏鑫燧,张晓峰,等.基于三值光学计算机的并行快速 Fourier 算法实现[J].中国科学:信息科学,2017,47(7):846-862.

- 2002, 261(1): 218-244.
- [12] 赵恬茵. 复合指纹识别法研究黄土高原小流域泥沙来源[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [13] 李勉, 杨二, 李平, 等. 黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 161-167.
- [14] 李勉, 杨二, 李平, 等. 淤地坝坝系泥沙粒径组成与变化特征研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(4): 746-756.
- [15] 张凤宝, 薛凯, 杨明义, 等. 坝地沉积旋回泥沙养分变化及其对小流域泥沙来源的解释[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 143-149.
- [16] Zhao T Y, Yang M Y, Walling D E, et al. Using check dam deposits to investigate recent changes in sediment yield in the Loess Plateau, China [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 152: 88-98.
- [17] Wang L, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 917-927.
- [18] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [19] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18.
- (上接第 46 页)
- [9] 李建闽, 滕召胜, 吴言, 等. 基于移频滤波的频率测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 762-769.
- [10] Albert B, Francis J N. 小波与傅里叶分析基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [11] 肖毅, 杨胜发, 邵学军. 三峡水库水沙条件时序变化趋势研究[J]. 泥沙研究, 2017, 42(6): 22-27.
- [12] 戴会超, 王玲玲, 蒋定国. 三峡水库蓄水前后长江上游近期水沙变化趋势[J]. 水利学报, 2007(增刊 1): 226-231.
- [13] 孙鹏, 张强, 白云岗, 等. 基于马尔科夫模型的新疆水文气象干旱研究[J]. 地理研究, 2014, 33(9): 1647-1657.
- [14] 孙鹏, 张强, 涂新军, 等. 基于马尔科夫模型的鄱阳湖流域水文气象干旱研究[J]. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1177-1186.
- [15] Xu J X. Decreasing trend of sediment transfer function of the Upper Yellow River, China, in response to human activity and climate change [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, 60(2): 311-325.
- [16] 蔡明科. 关中地区水文、气象干旱特征对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 33-37.
- [17] 侯素珍, 王平, 楚卫斌. 黄河上游水沙变化及成因分析[J]. 泥沙研究, 2012(4): 46-52.
- [18] 许炯心. 黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1641-1649.
- [20] 田鹏, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于改进 RUSLE 模型的皇甫川流域土壤侵蚀产沙模拟研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 832-840.
- [21] 李景宗, 张永永, 赵帮元, 等. 皇甫川特拉沟小流域近期泥沙减少成因分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(4): 1-4.
- [22] 惠波, 李鹏, 张维, 等. 王茂沟流域淤地坝系土壤颗粒与有机碳分布特征研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 1-5.
- [23] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [24] Zhao G J, Klik A, Mu X M, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2015, 241: 343-352.
- [25] Walling D E, Owens P N, Leeks G J L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 13(7): 955-975.
- [26] Motha J A, Wallbrink P J, Hairsine P B, et al. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia [J]. *Water Resource Research*, 2003, 39(3): 53-62.
- [27] 冉大川, 左仲国, 上官周平. 黄河中游多沙粗沙区淤地坝拦减粗泥沙分析[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 443-450.
- [28] 高海东. 黄土高原丘陵沟壑区沟道治理工程的生态水文效应研究[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院研究生院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2013.
- [19] 田世民, 郭建英, 尚红霞, 等. 乌兰布和沙漠风沙入黄量研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(7): 65-70.
- [20] 田世民, 姚文艺, 郭建英, 等. 乌兰布和沙漠风沙入黄影响因子变化特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1701-1707.
- [21] 李晓宇, 刘晓燕, 李焯. 黄河主要产沙区近年降雨及下垫面变化对入黄沙量的影响[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1253-1268.
- [22] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域上游降水时空结构特征[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 27-33.
- [23] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3): 331-354.
- [24] Shi C X, Dian Z, You L Y. Changes in sediment yield of the Yellow River basin of China during the Holocene [J]. *Geomorphology*, 2002, 46(3): 267-283.
- [25] 朱吉生, 李纪人, 黄诗峰, 等. 近 30 年十大孔兑流域植被覆盖度空间变化的遥感调查与分析[J]. 中国水土保持, 2015(7): 68-70.
- [26] 刘通, 黄河清, 邵明安, 等. 气候变化与人类活动对鄂尔多斯地区西柳沟流域入黄水沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 17-22.