黄河干流头道拐水文站水沙运动特征及影响因素

赵水霞[1]，王文君[1]，全 栋[2]，李 超[2]，吴英杰[1]，全 强[1]，孙泽辉[3]

(1.水利部牧区水利科学研究所,呼和浩特 010020;
2.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;3.山西省环境科学研究院,太原 030027)

摘要: 为明确黄河干流头道拐水文站水沙运动过程、变化趋势及运动状态特征,以 2006—2018 年黄河干流头道拐水文站水沙数据为基础,基于累积距平法、R/S 极差分析法、河道来沙系数与不协调度等研究方法,对头道拐水文站水沙运动过程进行系统分析。结果表明:头道拐水文站年际间径流与输沙量和年内月均径流与输沙量变化趋势均呈现良好的一致性,但两者的季节性差异特征显著,且输沙量的显著性较径流更突出;冬季径流与输沙量变化趋势同步性相比其他季节较差,季节性的极差 Hurst 指数揭示了冬季输沙量变化趋势的反持续性和水沙不协调性易引起河道的冲淤演变;以来沙系数为水沙状态的划分依据,春季、夏季和秋季水沙特征多呈现水少沙多的状态,而冬季水沙状态则为水多沙少,水沙协调状态会出现在春季个别年份;季节性水沙不协调度总体呈夏季>秋季>春季>冬季的变化特征,特殊的来水来沙过程、水文气候特征及人类活动变化是造成水沙不协调的主要影响因素。

关键词: 黄河; 头道拐水文站; 水沙运动; 不协调度; 影响因素

中图分类号:TV882.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242(2021)01-0125-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.018

Characteristics and Impacting Factors of Flow-Sediment Movement at Toudaoguai Hydrological Station of the Yellow River

ZHAO Shuixia[1], WANG Wenjun[1], QUAN Dong[2], LI Chao[2],
WU Yingjie[1], QUAN Qiang[1], SUN Zehui[3]

(1.*Institute of Water Resources for Pastoral Area*, *Ministry of Water Resources*, *Hohhot* 010020; 2.*College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018; 3.*Shanxi Academy of Environmental Sciences*, *Taiyuan* 030027)

Abstract: To clarify the characteristics of flow-sediment movement process, changing tendency and movement state of Toudaoguai hydrologic station of the Yellow River, based on the flow and sediment data of Toudaoguai hydrological station in the Yellow River from 2006 to 2018, the flow-sediment movement process was systematically analyzed by using the cumulative anomaly, R/S range analysis, sediment coefficient and incoordination degree methods. The results showed that the inter-annual and monthly average variation of flow-sediment discharge in Toudaoguai station were well consistent, but the seasonal differences between them were significant, and the significance of sediment discharge was more prominent than runoff. Compared with other seasons, the synchronicity of variation trend of flow and sediment discharge in winter was worse. The Hurst index of seasonal revealed that the reverse persistence of the variation trend of sediment discharge, and the incongruity of flow and sediment in winter, could easily lead to erosion and deposition of the river channels. Based on sediment coefficient, which was the basis for the division of water and sediment states, the flow and sediment states were divided into three types, less water and more sediment was the characteristics of flow and sediment state in spring, summer and autumn, while in winter the state was more water and less sediment, and the flow-sediment coordination state appeared in spring of very few years. The incoordination degree of seasonal flow-sediment followed the order of summer > autumn > spring > winter. The special water and sediment inflow process, hydrological and climatic characteristics and human ac-

收稿日期:2020-07-06
资助项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2020BS05038);国家自然科学基金项目(52009084,51669024)
第一作者:赵水霞(1992—),女,博士,工程师,主要从事水力学河流动力学研究。E-mail:zhaosx@iwhr.com
通信作者:全栋(1992—),男,硕士,讲师,主要从事河流泥沙运动力学研究。E-mail:13644769625@163.com

tivities were the main factors influenced the imbalance of flow and sediment.

Keywords: Yellow River; Toudaoguai hydrologic station; flow-sediment movement; degree of incoordination; impact factors

黄河干流头道拐水文站地处黄河宁蒙河段下游，既是黄河干流上游的出口站，也是黄河干流中游的入口站，其直接承纳上游“十大孔兑”及山洪沟的汇入，属典型风水侵蚀活跃区域[1-2]。十大孔兑为季节性河流，区域内植被稀少，水土流失严重，且主要以粗颗粒泥沙输入黄河，导致下游头道拐河段不断发生冲淤变化[2]。近年来日益频繁的人类活动及水文气候特征的变化使得头道拐水文站水沙运动关系具有一定的复杂性与变异性，国内外专家学者基于野外监测、数据分析、物模试验及数值模拟研究，从不同角度开展十大孔兑下游头道拐河段泥沙颗粒运动特性、泥沙输移规律与影响因素、河道形态演变及泥沙运动数学模型等方面的研究，取得了丰富的研究成果[3-5]。冉大川等[6]根据 1950—2010 年水文数据资料，对头道拐水文站年径流输沙系列进行突变点识别，明确 1985 年和 1986 年分别为年输沙量与年径流量变化的主要突变点，为进一步分析水沙关系变化及其驱动因子贡献率奠定基础；李超等[7]通过对黄河(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时序特征、状态特征及演变趋势进行分析，指出黄河(内蒙古段)水沙不协调性特征明显且未来水沙运动向着协调的趋势演变；冉立山等[8]通过多年间对头道拐断面监测，指出断面形态变化受上游水库运行的影响，横向摆动速率大幅减小，断面形态和位置趋于稳定；马超等[9]采用变化范围法对龙羊峡和刘家峡水库运行前后头道拐水文站日均径流量和含沙量变化程度进行分析，指出头道拐水文站径流与含沙量均呈现减少的变化特征，且汛期水沙运动过程受水库运行的影响程度较高。通过以上研究可知，在不断变化的气候环境及复杂人类活动背景影响下，黄河水沙关系也在不断发生着变化，作为黄河流域水土流失重点治理区域与水沙运动变化规律研究的热点河段，系统性的分析和开展头道拐河段水沙运动特征、发展趋势及影响因素研究对水土保持及流域可持续发展具有重要意义。

综上所述，本文以黄河干流头道拐水文站为研究对象，基于 2006—2018 年研究区逐月水沙数据资料，采用统计学的方法分析水沙运动的年内、年际和季节性变化特征，通过累积距平法和 R/S 极差分析法分析水沙季节性趋势变化特征，同时以河道来沙系数为水沙运动状态划分依据，采用不协调度衡量水沙变化关系，探究头道拐水文站水沙运动过程的主要影响因素，旨在揭示黄河干流头道拐水文站水沙变化关系，为进一步研究黄河水沙关系与泥沙治理提供一定的借鉴。

1 区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

黄河干流内蒙古段(图 1)位于黄河流域最北端，河道逶迤曲折，呈“几”字形大弯形状，自宁夏石嘴山入境，至鄂尔多斯市准格尔旗出境，全长 840 km，多年平均天然年径流量为 335.9 亿 m^3。河段内有石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、包头和头道拐 5 个水文站，其中头道拐水文站位于黄河干流内蒙古段下游呼和浩特市托克托县境内，区域受大陆性季风气候影响而呈现春季干旱大风、夏季热雨、秋季凉爽、冬季寒冷漫长的气候变化特征。年平均气温 4～8 ℃，降水量 150～450 mm，年蒸发量 1 200～2 000 mm，气温和降水具有明显的季节性变化特点。头道拐水文站上游属平原型河道，河面宽缓，水深较浅；头道拐水文站以下河段进入峡谷型河道，河面窄深，水流较急。河段内主要支流为南岸的“十大孔兑”和北岸的昆都仑河、五当沟等，支流流域内植被较差、土质松散且胶结能力弱，汛期山洪挟带大量泥沙以冲泄的形式汇入黄河，极易造成河道主河槽摆动、河势变化及水土流失[10]。

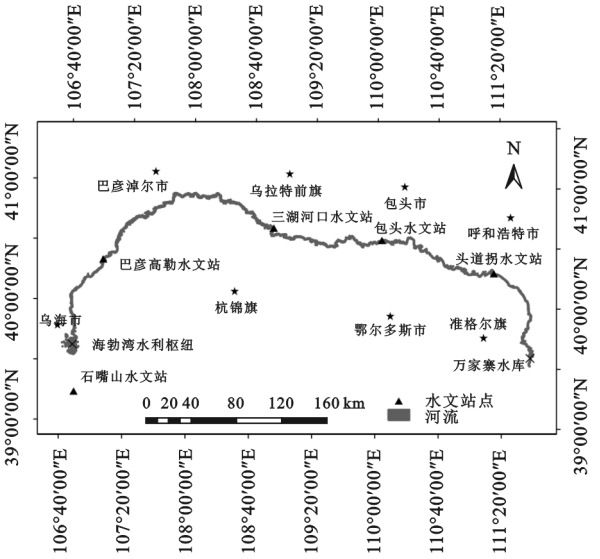


图 1 研究区位置

1.2 研究方法

1.2.1 累积距平法 黄河干流头道拐水文站径流与输沙量的趋势性分析采用累积距平法，累积距平法是一种非线性统计方法，通过观察累积距平值随时间的变化过程曲线来判断离散点数据的变化趋势[11]。对于数据序列 $x_i(i=1,2,3,\cdots,n)$，其某一时刻 t 的累积距平 $\tilde{x}$ 计算公式为：

$$\widehat{x}=\sum_{i=1}^{t}(x_i-\overline{x}) \tag{1}$$

式中：x_i 为第 i 时刻序列值；$\overline{x}$ 为序列均值。

1.2.2　*R/S* 极差分析　黄河干流头道拐水文站径流与输沙量变化趋势的持续性通过 Hurst 指数 H（$0<H<1$）进行判断分析，对径流与输沙量时间序列进行 R/S 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值即为 Hurst 指数值[12]。当 $H<0.5$ 时，时间序列表现为反持续性，即时间序列未来变化趋势与过去相反，H 越小，反持续性越强；当 $H=0.5$时，表明时间序列是完全独立的随机过程；当 $H>0.5$ 时，时间序列表现为持续性，即时间序列未来变化趋势与过去一致，H 越大，正持续性越强。R/S 极差分析法原理为：对于一个时间序列 $k(t)$，$t=1,2,3,\cdots,n$，当任意正整数 $1\leqslant t\leqslant n$，计算各参数公式为：

$$\text{均值}:k_n=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}k(t) \tag{2}$$

$$\text{累积离差}:X(t,n)=\sum_{t=1}^{n}(k(t)-k(n)) \tag{3}$$

$$\text{极差}:Rn=\max X(t,n)-\min X(t,n) \tag{4}$$

$$\text{标准差}:S(n)=\left[\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(k(t)-k_n)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

1.2.3　水沙状态分析　河道来沙系数主要反映河道输沙能力与水沙变化关系，定义为含沙量与流量的比值，计算公式[13]为：

$$\zeta=\frac{S}{Q} \tag{6}$$

式中：S 为含沙量（kg/m^3）；Q 为流量（m^3/s）；ζ 为来沙系数（$(kg\cdot s)/m^6$）。

现依据河道来沙系数将水沙运动状态划分为水少沙多（$\zeta\geqslant0.011$）、水沙协调（$0.009\leqslant\zeta<0.011$）与水多沙少（$\zeta<0.009$）3 种状态[14]。当黄河干流头道拐水文站水沙运动状态表现为不协调时，采用不协调度进行衡量，计算公式为：

$$D=\frac{\zeta-d_{\max}}{d_{\max}-d_{\min}}\qquad(\zeta\geqslant d_{\max}) \tag{7}$$

$$D=-\frac{d_{\min}-\zeta}{d_{\max}-d_{\min}}\qquad(\zeta\leqslant d_{\min}) \tag{8}$$

式中：D 为不协调度；$d_{\max}$ 与 $d_{\min}$ 分别为来沙系数上限与下限。

2　结果与分析

2.1　水沙运动年际、年内与季节特征

根据黄河干流头道拐水文站 2006—2018 年实测水沙数据资料来分析水沙运动年际和年内变化特征。从图 2 可以看出，年径流与年输沙量的年际变化呈现一致性的变化趋势，具有典型的正相关关系；2006—2012 年，年径流与年输沙量呈现波动中平稳变化的特征；2012—2016 年，两者呈显著的下降趋势，年径流与年输沙量分别由 2012 年的 285.61 亿 m^3，7 469.70 万 t 下降至 2016 年的 114.79 亿 m^3 和 1 629.20 万 t，下降幅度分别为 59.81%，78.19%；2016—2018 年，年径流和年输沙量呈现明显上升的变化趋势，且均在 2018 年出现峰值。由图 3 可知，凌汛期 3 月河段解冻开河，冰盖下槽蓄水量释放及冰层消融转化为水体，使得径流量迅速增加，而此时河岸土壤解冻及水力作用侵蚀，易造成河岸的坍塌现象，加之春季大风携带泥沙入黄，使河道内输沙量增加；4—5 月，河道水势渐趋平稳，风沙入黄作用逐渐减弱，受上游沿黄灌区春季引水灌溉等的影响，河道内径流和输沙量呈一定的下降趋势；6—9 月，河道处于夏汛和秋汛时期，河道上游来水量增加，流域径流和输沙量在暴雨或洪水影响下呈现显著增大的趋势；10 月秋汛期之后，河道径流和输沙量呈现明显下降的变化趋势，至 12 月河道封冻，冰层的存在增大了水流阻力，使得河道过流能力与水流输沙能力明显减弱，导致河道内径流和输沙量的降低。

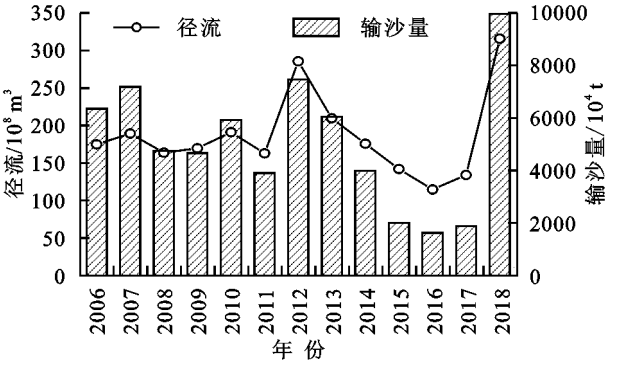


图 2　水沙年际变化

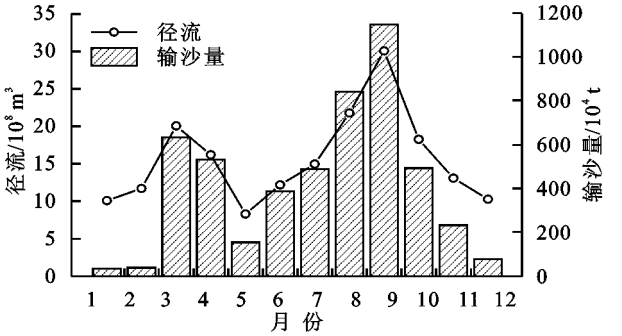


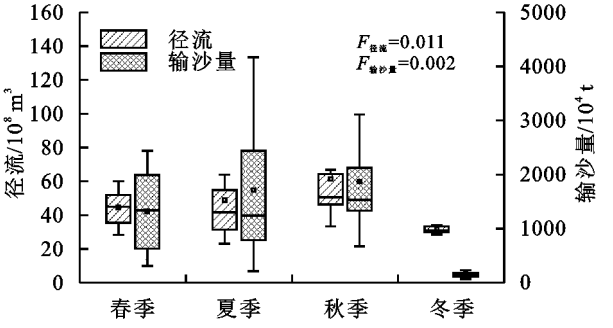
图 3　水沙年内变化

按照自然年进行数据统计，通过单因素方差分析方法对头道拐水文站 2006—2018 年春季（3，4，5 月）、夏季（6，7，8 月）、秋季（9，10，11 月）和冬季（1，2，12 月）的径流与输沙量季节性差异特征进行分析（图 4）。由图 4 可知，头道拐水文站多年径流与输沙量的季节性变化呈现秋季＞夏季＞春季＞冬季的特征，在 0.05 显著性水平条件下，径流和输沙量的 P 值分别

为 0.011,0.002,表明径流与输沙量均呈现明显的季节性差异,且输沙量季节间差异性较径流更为显著;且不同季节径流的变异系数 CV 值分别为 0.243(春)、0.495(夏)、0.506(秋)和 0.146(冬),输沙量的变异系数分别为 0.519(春),0.691(夏),0.515(秋)和 0.300(冬),表明夏季和秋季的径流值变异性较大,最大值与最小值相差悬殊,而输沙量除夏季和秋季外,春季变异性也较大;除此之外,输沙量的季节性变化特征较径流更为剧烈。

2.2 水沙运动趋势性特征

采用累积距平法对黄河干流头道拐水文站 2006—2018 年水沙运动的季节性趋势特征进行分析。由图 5 可知,头道拐水文站近 13 年春季、夏季和秋季径流与输沙量的累积距平值变化过程基本一致,而冬季差异性较明显;多年春季径流与输沙量的累积距平持续为正值,整体呈现先增加后下降的变化特点,而夏季、秋季和冬季则呈明显无规律性的波动变化,且冬季输沙量累积距平变化过程较径流累积距平变化过程更为剧烈。对头道拐水文站各季节径流与输沙量之间进行 Kendall τ 相关检验,得出研究区春季、夏季、秋季和冬季的相关检验 τ 值分别为 0.897,0.846,0.769 和 0.308,表明春季、夏季和秋季径流与输沙量的变化过程之间具有显著的相关性,而冬季两者之间的变化过程相关性并不显著。



注:框图中□为平均值;┅为中位值;—为最大(小)值。

图 4 水沙季节性差异特征

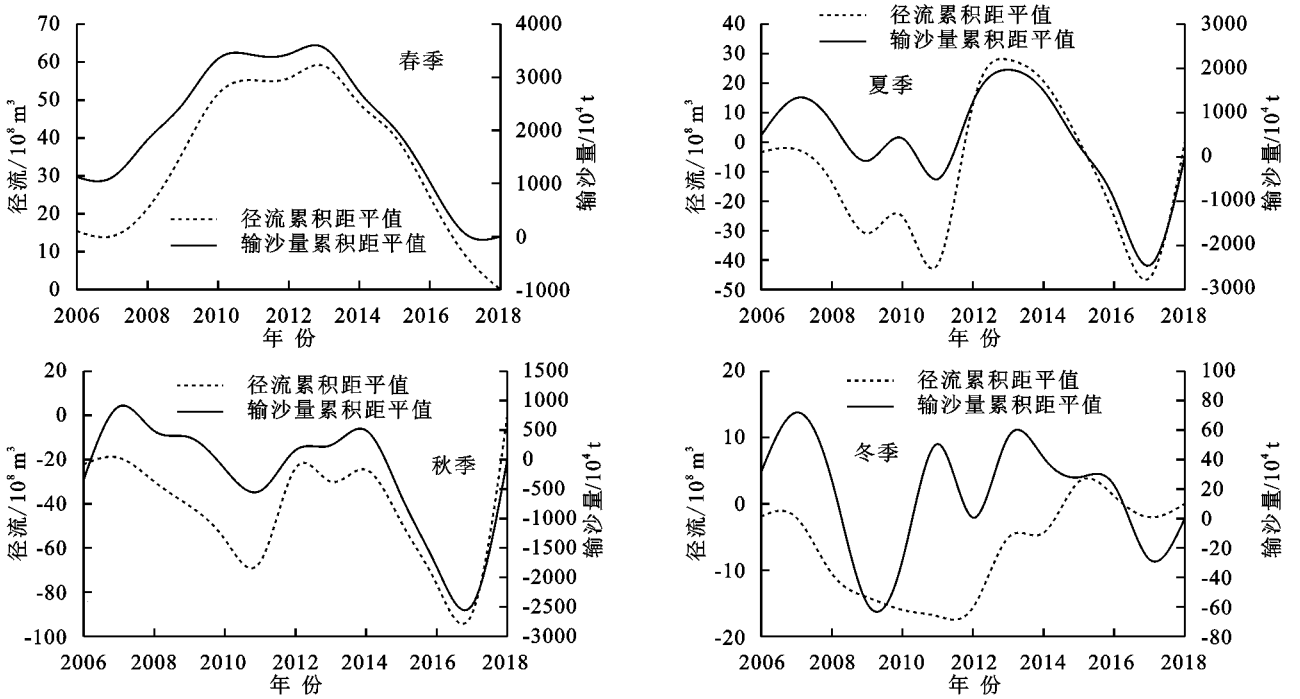


图 5 径流与输沙量累积距平值

对头道拐水文站各季节径流与输沙量进行 R/S 极差分析,获得各季节径流序列与输沙量序列的 Hurst 指数值。由表 1 可知,春季、夏季和秋季径流序列与输沙量序列的 Hurst 指数值均大于 0.5,表明两者时间差分序列前后变化呈正相关,且时间序列变化具有持续性,表现为径流与输沙量未来变化趋势将与现在变化趋势一致;冬季径流序列的 Hurst 指数值大于 0.5,表明冬季径流未来变化趋势与现在变化趋势一致,而输沙量序列的 Hurst 指数值小于 0.5,表明冬季输沙量的时间差分序列前后变化呈负相关,且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。

表 1 径流与输沙量季节 Hurst 值

季节	径流	输沙量
春季	0.623	0.531
夏季	0.584	0.518
秋季	0.558	0.514
冬季	0.598	0.453

通过对黄河干流头道拐水文站各季节径流与输沙量趋势性分析可知,春季、夏季和秋季径流与输沙量变化趋势具有同步性,而冬季径流与输沙量变化趋势具有明显非同步性,且冬季输沙量变化趋势呈反持续性,表明黄河干流头道拐水文站水沙运动状态呈现

不协调性,河道来水与输沙能力不相匹配,易引起河道的冲淤变化,尤其冬季河道封冻后,河道水力特性的变化对泥沙的分布和输移产生重要的影响[15]。

2.3　水沙运动不协调性特征

采用公式(6)对头道拐水文站 2006—2018 年季节性来沙系数进行计算,结合来沙系数的物理意义,统计分析来沙系数的季节性变化特征。由表 2 可知,头道拐水文站春季、夏季、秋季和冬季的来沙系数变化范围分别为 0.009 9～0.026 1,0.006 9～0.027 4,0.004 9～0.025 7,0.002 3～0.006 3 (kg·s)/m^6,13 年间,河道来沙系数变化幅度较小,且均值呈夏季>春季>秋季>冬季的特征。河道来沙系数越大,表明单位流量水体中含沙量越高,河道输沙能力相对越高,且水沙搭配关系越不协调,易出现超饱和状态而导致泥沙淤积。因此,头道拐水文站河道夏季输沙能力最大,且河道易于产生淤积,而冬季输沙能力最小,河道易于形成冲刷。对季节性来沙系数进行 R/S 极差分析,得到春季、夏季、秋季和冬季来沙系数序列的 Hurst 指数值分别为 0.429,0.637,0.537,0.463,表明夏季和秋季来沙系数未来变化趋势与现在变化趋势一致,而春季和冬季未来变化趋势与现在变化趋势相反,揭示了头道拐水文站未来夏季和秋季的水沙不协调性关系将持续存在,而春季和冬季的水沙不协调性关系将有所改善。

表 2　各季节来沙系数值

单位:(kg·s)/m^6

季节	最小值	最大值	均值
春季	0.0099	0.0261	0.0157
夏季	0.0069	0.0274	0.0182
秋季	0.0049	0.0257	0.0148
冬季	0.0023	0.0063	0.0040

黄河干流头道拐河段独特的地质地貌条件、水文气候特征与复杂的人类活动导致河道内水沙变化过程具有一定的不确定性。因此,本文以来沙系数为依据,将水沙运动状态划分为水少沙多($\zeta \geqslant 0.011$)、水沙协调($0.009 \leqslant \zeta < 0.011$)与水多沙少($\zeta < 0.009$)3 种状态。按照水沙运动状态划分原则,以头道拐水文站 2006—2018 年各季节来沙系数为依据,统计分析水沙状态频率情况(表 3),研究区水沙不协调度季节性变化特征如图 6 所示。综合分析表 3 与图 6,头道拐水文站水沙状态仅在 2014 年,2016 年和 2017 年的春季呈现水沙协调特征,其余年份水沙状态均不协调;不协调度总体呈夏季>秋季>春季>冬季的特征;春季、夏季和秋季不协调度多数为正值,而冬季不协调度则均为负值,表明春季、夏季和秋季水沙状态主要以水少沙多为主,而冬季水沙状态则为水多沙少。头道拐水文站春季风沙入黄及夏季和秋季汛期流域产沙作用明显,加之灌溉引水与生态补水工程取用水,使得春季、夏季和秋季水沙关系主要呈现水少沙多的状态;而冬季河道封冻后,黄河干流内蒙古段水流含沙量仅为敞流期的 1/20,河道水力特性的变化使得河道输沙量显著降低,水沙关系均呈现水多沙少的状态[16]。

表 3　水沙状态频率　　单位:%

季节	水多沙少	水沙协调	水少沙多
春季	0	23.08	76.92
夏季	15.38	0	84.62
秋季	15.38	0	84.62
冬季	100.00	0	0

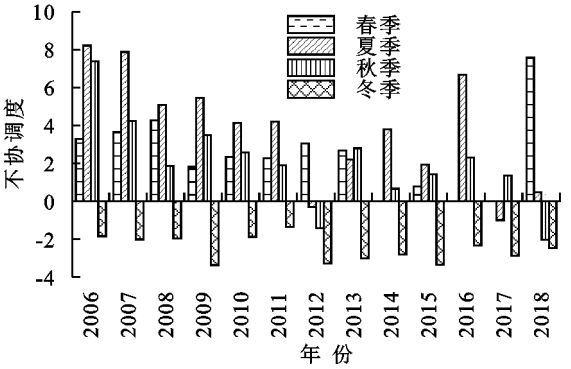


图 6　不协调度季节性变化

3　讨 论

3.1　来水来沙过程

黄河干流头道拐水文站地处内蒙古段下游,来水来沙过程具有明显的差异性,表现为水沙异源的特征。对头道拐水文站径流与输沙量进行迟滞相关分析(表 4)发现,输沙量在迟滞 5,6 年的情况下,与径流具有明显的相关性;径流在迟滞 6,7,11 年的情况下,与输沙量具有明显的相关性,说明头道拐水文站来水来沙过程的差异导致径流与输沙量之间具有明显的非同步性。黄河干流内蒙古段径流来源于上游唐乃亥以上山区,以发电为主的多年调节水库龙羊峡水库建成蓄水后,极大地改变了下游的径流过程,导致汛期径流大幅度减小,输沙能力减弱[17]。头道拐水文站上游沿黄两岸分布有乌兰布和沙漠和库布齐沙漠,相关研究[18-19]发现,乌兰布和沙漠 1954—2016 年年均风沙入黄量为 335.78 万 t;通过对黄河干流内蒙古段河道淤积泥沙取样分析发现,河道内 80%的泥沙属于风成沙,主要来源于乌兰布和沙漠与库布齐沙漠;同时上游流域内分布有昆都仑河、十大孔兑及山洪沟等,在强降雨及暴雨条件等的影响下,孔兑及山洪沟等极易产生水土流失,并携带大量泥沙汇入黄河,以十大孔兑为例,年输沙量可达 2 097.7 万 t[20]。因此,头道拐水文站河段来水来沙差异性特征是水沙运动变化过程的重要影响因素。

3.2 水文气候特征

黄河干流头道拐水文站地处西北内陆中纬度地区，海拔相对较高，复杂变化的水文气候特征对水沙运动过程产生着重要的影响[21]。已有研究[22]表明，黄河宁蒙河段 1973—2013 年，平均风速呈下降的变化趋势，年最大风速和大风日数下降趋势显著，风速的降低导致风速流输沙率降低，减弱了区域风沙活动强度，使得风沙入黄量减少。此外，兰州至头道拐区间降水量自 2000 年以来呈现减少的变化趋势，与 1969 年之前相比，区间降水量由 274.6 mm 减少至 196.5 mm，减小幅度达 28.4%，降水量的减少，尤其汛期降水量的减少必然引起流域产沙量的降低，2000 年以来，“十大孔兑”因降水量变化影响，年均产沙量约减少 0.5 亿 t[23]。头道拐水文站 2007—2016 年降水量与输沙量的变化过程如图 7 所示，可以看出，降水量在 2007—2009 年间显著下降，在 2009 年之后呈缓慢上升的变化趋势；输沙量在 2007—2012 年间处于波动变化，而在 2012 年之后呈明显下降趋势，表明近年来降水量增加，而输沙量却明显下降，说明降水量对输沙作用的影响逐渐减弱。

表 4 迟滞相关分析

迟滞时间/a	r_1	r_2
1	0.324	0.156
2	0.490	0.394
3	0.387	0.340
4	0.360	0.277
5	0.683	0.363
6	0.872	0.501
7	0.325	0.555
8	0.316	0.276
9	0.220	0.169
10	0.227	0.161
11	0.343	0.530
12	0.229	0.405

注：r_1 为输沙量迟滞－径流相关系数；r_2 为径流迟滞－输沙量相关系数。

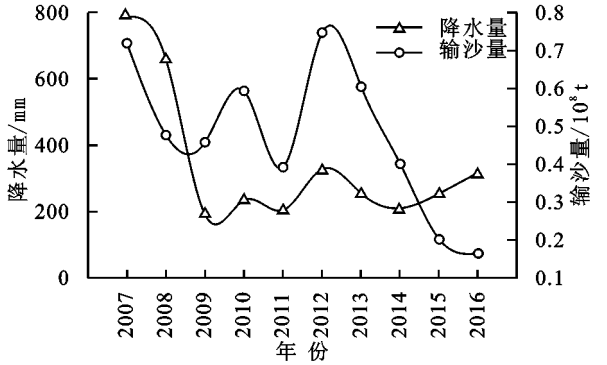


图 7 降水与年输沙量关系

3.3 人类活动

随着社会地不断进步和发展，日益频繁的人类活动对区域生态环境变化产生越来越重要的影响，黄河干流头道拐水文站水沙运动与流域内人类活动存在着密切联系，水沙运动过程的主要影响因素有流域水土流失治理、工农业取水、引水引沙工程及河道水利工程调水拦沙等[24]。党的十八大以后，生态文明和绿色发展理念指导流域水土流失高标准系统治理，近 20 年黄土高原地区增加水土保持措施面积 21.3 万 km^2，治理水土流失面积近 50%，林草覆盖率由总体不到 20%增长至 63%，梯田面积由 1.4 万 km^2 增长到 5.5 万 km^2，此外淤地坝工程建设与小流域综合治理工程的实施，也使得 2000—2018 年黄河含沙量较 1919—1959 年锐减 85%，有效降低了黄河沙量[25-26]。头道拐水文站上游十大孔兑流域内退耕还林、还草工程的有效实施使得植被覆盖率自 1990—2010 年由 20.76%增加为 25.92%，有效增强了流域水土保持能力，减少了河段来沙量[27]。自 2019 年习总书记考察黄河流域，提出将黄河流域生态保护和高质量发展作为重大国家战略，黄河流域进入保护与治理协同推进的时代，随着“绿水青山就是金山银山”的理念深入人心，在人类活动影响下，未来黄河干流头道拐水文站水沙运动不协调性特征将不断改善，水沙运动过程也会呈现新的变化。

4 结 论

(1)黄河干流头道拐水文站径流与输沙量年际、年内变化过程具有一致性的变化趋势，而季节性差异特征显著，多年平均季节性径流与输沙量呈现秋季＞夏季＞春季＞冬季的特征，且输沙量季节性的差异和离散程度较径流量明显；径流与输沙量的变化趋势在春季、夏季和秋季具有同步性，而在冬季则呈现明显的非同步性，表明头道拐水文站水沙运动呈现不协调性特征。

(2)黄河干流头道拐水文站季节性水沙不协调度呈夏季＞秋季＞春季＞冬季的特征，依据来沙系数将水沙运动状态划分为水少沙多、水沙协调与水多沙少 3 种状态，其中，春季、夏季和秋季水沙运动以水少沙多状态为主，而冬季水沙运动则表现为水多沙少状态。

(3)河道来水来沙过程的差异性、水文气候特征的复杂变化性及日益加剧的人类活动是造成头道拐水文站水沙运动不协调发展的主要影响因素。

参考文献：

[1] 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-Journal Des Sciences Hydrologiques, 2015, 60(2): 311-325.

[2] 孟志华，孟阵.黄河内蒙古段十大孔兑产沙量估算模型分析[J].水电能源科学，2015，33(10)：76-78.

[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] 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.
[5] 时芳欣,郜国明,王远见,等.基于不协调度的黄河下游水沙变化分析[J].人民黄河,2020,42(5):52-55,61.
[6] 冉大川,姚文艺,焦鹏,等.黄河上游头道拐站年径流输沙系列突变点识别与综合诊断[J].干旱区研究,2014,31(5):928-936.
[7] 李超,全栋,张岩,等.黄河(内蒙古段)水沙运动过程特征及演变趋势[J].水土保持学报,2020,34(1):41-46,53.
[8] 冉立山,王随继,范小黎,等.黄河内蒙古头道拐断面形态变化及其对水沙的响应[J].地理学报,2009,64(5):531-540.
[9] 马超,崔冉昕.基于变化范围法的黄河头道拐站水沙变化分析[J].水力发电学报,2018,37(5):58-68.
[10] 李畅游,李超,史小红,等.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.
[11] 魏晓婷,黄生志,黄强,等.定量分解气候变化与人类活动对季节径流变异的贡献率[J].水土保持学报,2019,33(6):182-189.
[12] 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.
[13] 陈康,苏佳林,王延贵,等.黄河干流水沙关系变化及其成因分析[J].泥沙研究,2019,44(6):19-26.
[14] 李国英.黄河中下游水沙的时空调度理论与实践[J].水利学报,2004,35(8):1-7.
[15] 全栋,李畅游,李超,等.冰封期黄河悬移质泥沙分布特性研究[J].泥沙研究,2018,43(2):21-26.
[16] 宋本辉,李畅游,李超,等.黄河内蒙古段冰封期泥沙输移特性与规律研究[J].泥沙研究,2015,40(1):36-41.
[17] 彭文昌,李永山.黄河内蒙古段异源水沙输移特性[J].中国沙漠,2016,36(3):805-813.
[18] 杨根生,拓万全,戴丰年,等.风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响[J].中国沙漠,2003,23(2):54-61.
[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(2):65-70.
[20] 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.
[21] 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.
[22] 鲁俊,安催花,吴晓杨.黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J].泥沙研究,2018,43(6):40-46.
[23] 姚海芳,师长兴,顾畛逵.气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响[J].干旱区地理,2018,41(3):472-479.
[24] 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.
[25] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.
[26] 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.
[27] 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.

(上接第 124 页)

[32] Buttle J M, Dillon P J, Eerkes G R. Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams: An example from the Canadian Shield [J]. Journal of Hydrology, 2004, 287(1/4): 161-177.
[33] Meerveld T V, Weiler M. Hillslope dynamics modeled with increasing complexity [J]. Journal of Hydrology, 2008, 361(1/2): 24-40.
[34] Fu Z Y, Li Z X, Cai C F, et al. Soil thickness effect on hydrological and erosion characteristics under sloping lands: A hydropedological perspective [J]. Geoderma, 2011, 167/168: 41-53.
[35] Zhang J H, Jia L Z, Wang Y, et al. Tillage erosion effect on soil hydrological properties in a hilly landscape [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2017, 22(9): 1-9.
[36] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27(3): 790-796.
[37] Govers G. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17(5): 515-528.
[38] Qin C, Zheng F L, Zhang X J, et al. A simulation of rill bed incision processes in upland concentrated flows [J]. Catena, 2018, 165: 310-319.
[39] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills [J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865-876.
[40] Bryan R B, Poesen J. Laboratory experiment on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1989, 14(3): 211-231.