



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.001

刘晓芳, 黄河清, 樊金生. 汉道演变的水沙过程影响分析——以监利河段为例[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 01-08. LIU Xiaofang, HUANG Heqing, FAN Jinsheng. Impacts of variations of flow and sediment series on main channel switches: A case study on Jianli reach[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 01-08. (in Chinese)

汉道演变的水沙过程影响分析

——以监利河段为例

刘晓芳, 黄河清, 樊金生

(中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 长江中下游许多汉道河段主支汉易位频繁, 但对产生这一现象的主要驱动机理与影响因素一直争议不休。研究采用距平分析法、Mann-Kendall 分析与基于分形理论的极差分析法相结合的方式, 详细分析了监利河段 1951 年—2009 年间流量和输沙率时间序列年尺度的变化过程。结果表明, 流量及输沙率的 Hurst 数分别为 0.9430 和 0.9239, 均十分接近 1.0, 具有很强的持续性。Mann-Kendall 分析发现, 输沙率序列无明显突变, 流量序列仅在 1967 年出现突变, 主要由上游实施裁弯工程所致。系统分析来水来沙的匹配关系发现, 该河段主支汉易位时间与水沙序列匹配状态有明显的相关关系, 在“水多沙少”时期, 监利右汉为主汉; 而在“沙多水少”时期, 监利左汉为主汉。

关键词: 监利河段; 分汉河道; 主支汉易位; 流量; 输沙率; 匹配关系

中图分类号: TV131.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)05-0001-08

Impacts of variations of flow and sediment series on main channel switches: A case study on Jianli reach

LIU Xiaofang, HUANG Heqing, FAN Jinsheng

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Many anabranching reaches in the middle and lower reaches of Yangtze River frequently switch the main flow from one channel to another. The mechanism and influencing factors of the phenomenon are still elusive. To examine how the phenomenon is related to the changes in hydrological process, this study applied rescaled range analysis, Mann-Kendall test, and anomaly analysis methods and examined in detail the changes in the time series of annual flow discharge and annual sediment transport rate based on observations from 1951 to 2009 at Jianli hydrological station in the Middle Yangtze River. It was shown that the Hurst exponents of the time series of flow discharge and sediment transport rate were respectively 0.9430 and 0.9239, implying that both time series had very strong persistence. The Mann-Kendall test showed that a significant abrupt change occurred to the flow discharge time series in 1967, mainly resulting from a river cutoff project taking place upstream, and there was no significant abrupt change in sediment transport rate time series during the same period. An obvious correlation was found between the time of main channel switches in this reach and the matching relation between flow and sediment series. When there was abundant flow discharge and inadequate sediment, the right channel was the main channel; when there was abundant sediment and inadequate flow discharge, the left channel was the main channel.

Key words: Jianli reach; anabranching river; main channel switch; flow discharge; sediment transport rate; matching relation

HT6H 收稿日期: 2016-04-20 修回日期: 2017-04-19 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1934.028.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41601006; 41330751)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41601006; 41330751)

作者简介: 刘晓芳(1982), 女, 山东莱州人, 博士(后), 主要从事河床演变及流域管理方面研究。E-mail: xiaofy@126.com

通讯作者: 黄河清(1962), 男, 宁夏人, 研究员, 博士, 主要从事河流地貌及流域管理方面研究。E-mail: huanghq@igsrr.ac.cn

受到地形、地质、气候、植被等流域的自然地理因素及人类活动的影响,河道的来水来沙量会随时间或空间的变化呈现显著差异。由于河床演变是挟沙水流与河道边界长时间相互作用的结果,因此水沙条件的变化会直接影响到河床的演变过程。在分汉河道中,来水来沙通过两个或两个以上的汉道输运,并根据各汉道深泓线的高低来划分主支汉^[1]。通常情况下,主汉的分流比更大,流速高,挟沙能力强,支汉则相反。由于不同分汉河道中主支汉纵剖面形态本身相差很大,再加上水沙条件的差异,就使得分汉河道的演变过程相差迥异,主支汉兴衰交替的周期性差距很大,短则十多年,有些长达数百年不等^[2]。

汉道间的分流分沙常被认为与主支汉兴衰交替的周期性变化过程有着密切的关系^[3-5]。然而,分流分沙比是水沙过程与汉道床面形态相互作用的结果,水沙过程通过影响河床形态而使得汉道的分流分沙比发生调整,再加上人类活动的影响,使得分流分沙比变化频繁,规律性更加难以把握。另外,汉道分流分沙的实测资料相对稀少且不连续,这些使得从分流分沙的角度研究主支汉兴衰交替的周期性变化过程及趋势存在很大的困难。

汉道的河床演变对于水文过程的响应为学界所广泛接受^[6-7],然而很少有人研究河流水文序列的周期性、持续性和突变性是否对于主支汉易位的变化过程产生影响。水文序列通常可以表示为周期性、趋势性和随机性的组合,R/S 分析方法可用于研究介于周期性和随机性之间的时间序列,并被广泛用于分析河道径流过程的持续性^[8-10]。另外,人类活动(大坝水库的修建、河道的裁弯取直等)会使得水文序列发生突变,引起河道床面形态、断面形态甚至是平面形态的演变^[11-13],Mann Kendall 是一种检测气象和水文序列是否发生突变的常用方法^[9,14-16]。河流自然的水文情势指标形成一系列的时间序列,最典型的时间序列为流量序列、输沙率序列,由于弯道主流线曲率的变化是受到流量序列变化的影响^[17],分汉河道主支汉易位很大程度上也源于主流的摆动^[5,18],因此弯曲分汉河道中主流的摆动被认为与其流量序列的变化密切相关,并在文献[19]中得到证实。然而,当流量增加时,输沙率会呈现指数倍的增长,但很少有研究考虑输沙率序列以及水沙匹配关系变化对于主汉位置轮换的影响。

监利河段位于长江中游的下荆江的中部,长期以来主支汉易位频繁发生。本研究以监利河段为例,根据该河段流量和输沙率年序列的实际观测结果,采用时序距平分析法、Mann Kendall 突变分析与基于分

形理论的极差分析法相结合的方式,研究 1951 年-2009 年间流量和输沙率序列的持续性、突变性以及来水来沙之间的匹配关系,试图揭示上述水沙特征对于分汉河道中主汉位置轮换可能产生的影响。

1 研究区概况和数据来源

1.1 河段概况

监利河段位于长江中游下荆江的中段,上起塔市驿,下至天字一号,全长约 27 km,由监利河弯和裁弯后的上车湾新河段组成。该河段为典型的弯曲分汉河型,曲率为 1.72,乌龟洲将河弯水流分为左、右两汉(图 1)。该河段的上下游在 1967 年和 1969 年先后实施了中洲子和上车湾人工裁弯。1972 年 7 月,在该河段上游约 35 km 处的沙子子发生了自然裁弯。河段内设有监利(姚圻脑)水文站,多年平均径流为 3 543 亿 m³,5 月-10 月径流量占年径流量的 74%。河道泥沙主要来源于干流,多年平均输沙量为 3 174 亿 t。输沙量较径流更加集中,5 月-10 月输沙量占全年总输沙量的 90% 以上。

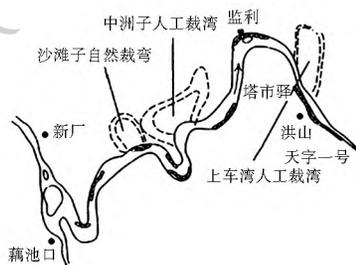


图 1 监利河段位置及平面形态示意图
Fig. 1 Planform and location of Jianli reach

1.2 主支汉易位的历史过程

据文献记载^[6,7,20-22],如图 2 所示,1931 年特大洪水使得监利右岸边滩被主流切割成江心洲,监利河段自此成为分汉河道,主流走右汉,到 1934 年,深泓移至右汉,左汉逐渐淤积衰退。随着江心洲右缘的崩退和右岸(凸岸)边滩的淤涨,到 1945 年前后,深泓摆动至左汉;1955 年-1969 年间,左汉稳定发展为主汉,右汉有萎缩的趋势;1971 年汛后,上游边滩下移,与乌龟洲洲头低滩连成一体,将监利左汉的门口堵塞,影响了左岸的进流条件,造成左汉衰退,右汉迅速发展。到 1974 年底,主流逐渐左移,到 1975 年枯水期,主流摆回到左汉。1976 年、1977 年左汉得到了一定的发展,然而到了 1978 年和 1979 年主流又逐渐右移,总体上两汉的分流比在 50% 左右摆动,形成两汉争流的相持局面,到了 1980 年以后主流稳定在左汉,左汉作为主汉的地位不断的巩固。到了 20 世纪 90 年代初再次形成两汉相持、南

北争流的局面。一直到 1993 年, 左汉不断淤积缩窄, 右汉则冲深展宽, 两汉的分流比在 50% 左右摆动。到了 1994 年汛后, 右汉迅速发展起来, 右汉的分流比已经超过 70%, 开始逐渐成为主汉。

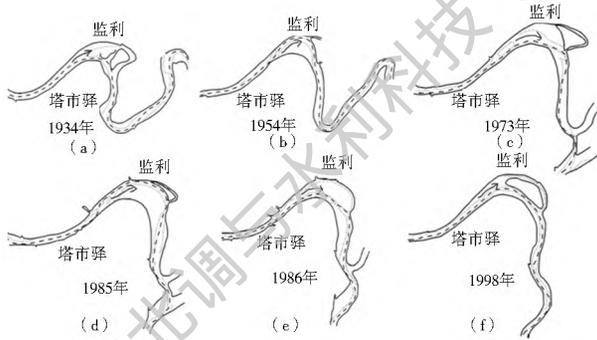


图 2 监利河段历史演变

Fig. 2 Main channel switches in Jianli reach

1.3 数据来源

本文以长江中游监利(姚圻脑)水文站 1951 年- 2009 年历年月均流量及月均含沙量为基础资料(数据来自长江流域水文年鉴), 月均输沙率由月均流量与月均含沙量的乘积求得, 再将月均流量及月均输沙率各自累加取平均值得到年均的流量及输沙率。由于该水文站 1960 年 7 月至 1966 年 3 月期间停测, 1970 年- 1974 年期间向下游迁至洪山。为了保证整个水沙序列的连续性, 前者采用上游新厂站月均流量与藕池河月均分流量的差值估算, 后者则采用下迁的洪山站资料来代替。监利、新厂、藕池口、洪山水文站的位置见图 1。

2 研究方法

2.1 R/S 分析法

R/S 法最初由英国水文学家 Hurst 在研究尼罗河水坝工程时提出, 后来 Mandelbrot 等^[23]从理论上对这一方法进行了补充和完善, 常用来分析时间序列的分形特征和长期记忆过程。一个时间序列 $\{\xi(i)\}$, $i=1, 2, \dots$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义其均值序列 $\langle \xi \rangle_\tau$ 、累计离差系列 $X(i, \tau)$ 、极差系列 $R(\tau)$ 以及标准差系列 $S(\tau)$ 分别为:

$$\left. \begin{aligned} \langle \xi \rangle_\tau &= \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi(i), \quad \tau = 1, 2, \dots \\ X(i, \tau) &= \sum_{u=1}^i (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau), \quad 1 \leq i \leq \tau \\ R(\tau) &= \max_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau) - \min_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau), \quad \tau = 1, 2, \dots \\ S(\tau) &= \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\xi(i) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right]^{1/2}, \quad \tau = 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} (1)$$

若存在 $R(\tau)/S(\tau) \propto \tau^H$, 则指数 H 被定义为

Hurst 指数, 常用 Hurst 指数的大小来反映时间序列的持续性以及对过去状态的记忆程度。对水文序列来说, 当 $H=0.5$ 时, 所研究的时间序列完全独立, 是一个随机过程。当 $0.5 < H < 1$ 时, 时间序列与过去状态具有长期的相关性, 过程具有持续性, 且 H 值越接近于 1, 持续性也就越强。相反, 当 $0 < H < 0.5$ 时, 未来的变化趋势与过去的变化情形正好相反, 过程具有反持续性, H 值越接近于 0, 反持续性越强。

2.2 Mann Kendall 突变分析法

Mann Kendall 方法常用于时序变量突变点的检验^[24]。一个具有 n 个样本量的时间序列 x_i ($i=1, 2, \dots, n$), 样本间相互独立, 具有相同的连续分布, 其秩序列 s_k 为第 i 时刻的样本 x_i 大于 j ($j=1, 2, \dots, i$) 时刻的样本 x_j 个数的累计数, 则 s_k 、 s_k 均值 $E(s_k)$ 、 s_k 方差 $\text{var}(s_k)$ 及统计量 UF_k 分别表示为:

$$\left. \begin{aligned} s_k &= \sum_{i=1}^k r_i, \quad k = 2, 3, \dots, n \\ E(s_k) &= \frac{k(k-1)}{4}, \quad k = 2, 3, \dots, n \\ \text{var}(s_k) &= \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, \quad k = 2, 3, \dots, n \\ UF_k &= \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \\ UF_1 &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

UF_i 为标准正态分布, 是按时间序列 x_i 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列, 给定显著性水平 α , 查正态分布表。若 $|UF_i| > U_\alpha$, 则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列 x_i 的逆序, x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 再重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k$ ($k=n, n-1, \dots, 1$), $UB_1=0$ 。将 UB_k 和 UF_k 两个统计量序列曲线和 U_α 两条直线绘制于同一图上, 若两条曲线在临界线范围内相交, 相交后 UF 超出临界直线, 则表明交点即为显著的突变点。

2.3 距平分析法

距平分析法^[24]是利用时序变量的距平序列来判别时序变量的丰枯水平的方法。一个时序变量 x_i , $i=1, 2, \dots$, 定义其距平序列 z_i 以及变差系数 C_v 为:

$$\left. \begin{aligned} z_i &= x_i - \bar{x} \\ C_v &= \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum z_i^2}{n-1}}}{\bar{x}} \end{aligned} \right\} (3)$$

式中: \bar{x} 为时序变量 x_i 的均值; n 为时序变量 x_i 的样本大小; σ 为时序变量 x_i 的标准差。 z_i 可正可负, 对某一时间序列而言, 正则表示该时段的变量相对于整体时间序列的平均值有一定的增加, 而负则表示该时段的变量相对平均值有一定的减少。变差

系数 C_v 的大小反映了时序变量 x_i 相对于整体时间序列平均值的离散程度; C_v 越大, 离散程度越大, 说明时序变量 x_i 的变化越强烈。

模比系数是时序变量 x_i 与其均值的比值, 模比系数的距平序列常用来衡量时序变量的丰枯程度或用于对比不同时序变量间的丰枯程度^[25], 模比系数距平序列的累计值称为模比系数的差积曲线, 能够反映出时序变量的丰枯变化周期, 其上升阶段为时序变量高于多年平均水平的时期, 水平段为时序变量与多年平均水平相当, 下降阶段则表示时序变量低于多年平均水平的时期。

3 结果

3.1 水沙序列变化特征

根据逐年流量和输沙率观测资料, 统计分析 1951 年-2009 年间流量与输沙率的特征值见表 1。流量在 $8\ 599\ \text{m}^3/\text{s}$ (2006 年) 和 $13\ 899\ \text{m}^3/\text{s}$ (1998 年)

之间变化, 多年平均值为 $11\ 227\ \text{m}^3/\text{s}$, 流量的年际变化偏小, 变差系数仅为 0.115。输沙率年际变化较流量大得多, 变差系数约为 0.35。输沙率最小值发生在 2006 年, 约为 $1\ 180\ \text{kg}/\text{s}$, 最大值发生在 1981 年, 约为 $15\ 967\ \text{kg}/\text{s}$, 二者相差十多倍。从图 3 所示的流量及输沙率距平序列的变化情况也可以明显的看出, 输沙率较流量的变幅大的多。同时还发现, 流量及输沙率都呈现震荡状态, 流量在 20 世纪 70 年代末 80 年代初经历了一个从枯水到丰水的转化过程, 而输沙率则经历了两次大的转折, 在 20 世纪 60 年代中期以后进入多沙期, 20 世纪 90 年代中期之后输沙率序列又逐渐减少至多年平均值以下。

表 1 监利站 1951 年-2009 年间流量与输沙率的特征值
Tab. 1 Descriptive data of flow discharge and sediment transport rate during 1951-2009 at Jianli hydrological station

年时序变量	最大值	最小值	均值	变差系数 (C_v)
流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	13 899	8 599	11 227	0.115
输沙率 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	15 967	1 180	10 058	0.350

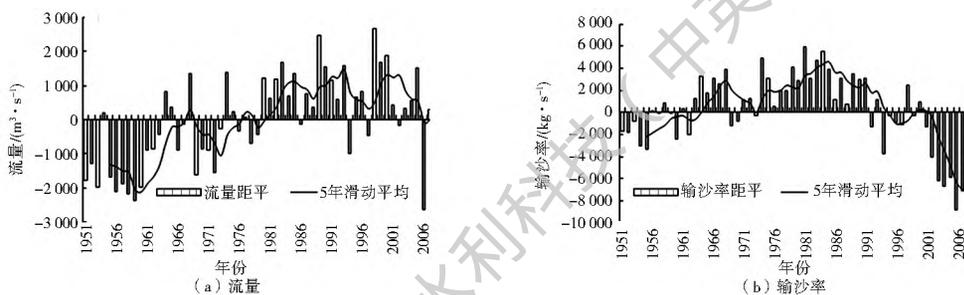


图 3 流量和输沙率距平序列的变化情况

Fig. 3 Anomalies of annual flow discharge and sediment transport rate

3.2 水沙过程的持续性

利用 R/S 分析法对 1951 年-2009 年间的逐年流量和输沙率序列的 Hurst 指数进行计算, 结果见图 4(a)、图 4(b)。从图中可以看出, 流量和输沙率的 Hurst 指数分别为 0.943 0、0.923 9, 不仅都大于 0.5, 且十分接近 1。这说明监利河段的流量、输沙率为分形式的布朗运动方式, 具有长记忆特性以及持续性, 且流量、输沙率序列的持续性都很强, 未来流量、输沙率序列的变化趋势与历史变化趋势呈正相关性。与输沙率相比, 流量的持续性更强。

3.3 水沙过程的突变分析

利用 Mann-Kendall 方法对逐年流量及输沙率进行突变分析, 图 5(a)、图 5(b) 分别为流量、输沙率序列的突变分析结果。由图 5(a) 可以看出, 流量序列存在显著性的突变点, 根据 UF 曲线和 UB 曲线交点的位置, 可以确定突变点出现 1967 年。中洲子裁弯工程于 1966 年动工, 1967 年 5 月新河过流, 由于该裁弯工程位于监利上游, 工程的实施一定程度上降低了该河段的水位, 增大了河段的泄洪流量, 因此裁弯工程可能是造成流量序列在 1967 年发生突变的原因, 此后监利站的流量呈现显著的增大趋势。观察图 5(b), 发现输沙率的统计量序列曲线 UF 和 UB 在临界线的范围内出现了多处交汇, 分别是 2006 年, 2007 年, 2008 年, 然而曲线相交后曲线并没有超出临界线, 这说明输沙率序列在这段时间内并无显著性突变。交点的出现可能是由于 2003 年三峡开始蓄水后拦蓄了大量的泥沙, 改变了坝下游河段的泥沙输移率, 到 2006 年以后这种影响开始蔓

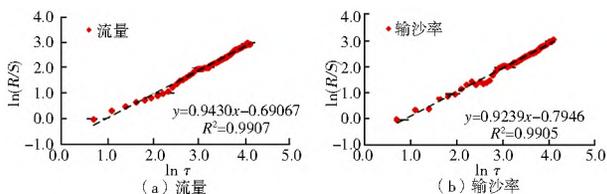


图 4 流量、输沙率 Hurst 指数

Fig. 4 Hurst exponents of annual flow discharge and sediment transport rate

延到监利河段。由于三峡的影响具有持续性和渐变性, 这种影响仍将持续下去。

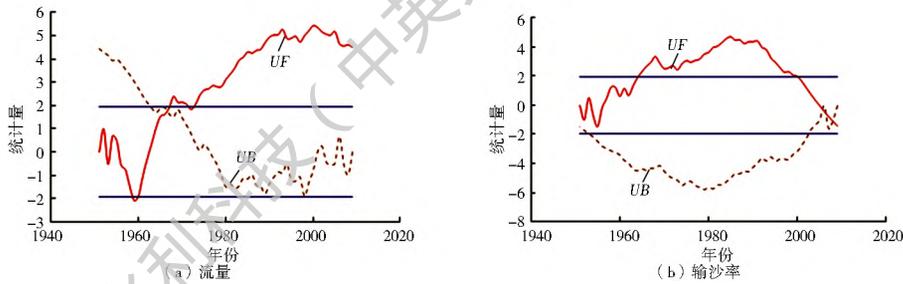


图5 Mann-Kendall 方法检验流量及输沙率的突变点
Fig. 5 Mann-Kendall test for abrupt changes in annual flow discharge and sediment transport rate

3.4 水沙过程的周期性及其匹配关系

图6分别为流量、输沙率的模比系数的差积曲线。从图6(a)中可以看出, 1951年-1962年, 1969年-1973年为枯水期; 1963年-1968年, 1974年-1979年, 1994年-1997年, 2002年-2009年为平水期; 1980年-1993年, 1998年-2001年为丰水期。总体看来, 1951年-2009年年均流量的变化过程可大致划分为两个阶段, 1980年以前流量以中枯水为主, 到1980年以后进入丰水期, 持续至今。从图6(b)中可以看出, 逐年输沙率的变化过程大致可以分为三个

阶段, 1951年-1962年属于少沙期; 1963年-1993年基本属于多沙期, 其中输沙率在1969年-1973年间经历了一个短暂的平沙期; 1994年到2001年属于过渡段, 监利站的年输沙率先后经历了少沙期和平沙期, 从2002年以后, 输沙率开始明显减小, 进入少沙期。从图6可以总结出, 流量、输沙率丰枯转换的周期较长, 约为30年, 这与前面利用距平分析法所得到的结果是一致的。由于该河段位于长江中游干流, 汇集了众多支流的降雨径流, 使得干流的水沙过程年际波动平缓, 周期偏长。

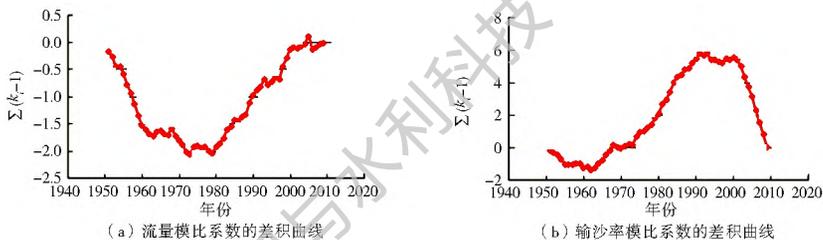


图6 监利站流量、输沙率模比系数的差积曲线
Fig. 6 Residual mass curves of annual flow discharge and sediment transport rate

利用图6模比系数的差积曲线, 可以将1951年-2009年间的流量、输沙率按照丰枯周期划分为几个时段(表2), 再利用各时段流量、输沙率的均值与多年平均值的比值可以判定出该时段来水来沙之间的匹配关系。由于各个时段内流量、输沙率近似, 当流量在某一时段的均值与多年均值的比值大于同一时段输沙率的均值与多年平均值的比值时, 就意味着该时段的来流量相对于其多年平均值大于来沙量相对其多年平均值, 或者说该时段为“水多沙少”期; 若小于该时段输沙率均值与多年平均值的比值, 则意味着来流量小于来沙量, 或者说该时段为“水少沙多”期。同时, 由于各个时段的平均值减少了单个年份的影响, 流量、输沙率匹配关系随时间变化有良好的规律性。从表2中可以明显的看出, 流量与输沙率的匹配关系在1994年前后开始发生变化, 从“沙多水少”期向“水多沙少”期转化。

表2 来水来沙的匹配关系

Tab. 2 The matching relation between flow discharge and sediment transport rate

时段	流量		输沙率	
	丰枯周期	时段平均值/多年平均值(%)	丰枯周期	时段平均值/多年平均值(%)
1951-1962	枯	86.0	枯	88.3
1963-1968	平	101.5	丰	126.2
1969-1973	枯	90.7	平	100.1
1974-1979	平	100.3	丰	127.2
1980-1993	丰	109.6	丰	128.6
1994-1997	平	100.0	枯	85.2
1998-2001	丰	114.8	平	104.6
2002-2009	平	101.1	枯	32.5

4 分析与讨论

根据前文监利河段支主汉易位的历史过程可以

发现,该河段主支汉的轮转周期少则几年,多则几十年不等,而流量、输沙率在 1 年时间尺度上的持续性很强,这说明主支汉易位与流量、输沙率的持续性并无明显的相关关系。另外,水沙的突变性分析结果表明,主支汉易位与流量、输沙率时序变量的突变点无明显的相关关系。

主汉的易位是挟沙水流与河床相互作用所引起的分汉河道最显著的演变特性,是水沙共同作用所形成的。通过前文水沙匹配关系的分析,结合监利主支汉易位的历史过程,可以发现监利河段主汉的位置与河段水沙匹配关系有关(表 3),自有水文资料(1951 年-2009 年)以来,在“沙多水少”的 1951 年-1971 年及 1980 年-1994 年间,左汉为主汉;而在“水多沙少”期,比如 1994 年汛期以后,右汉为主汉。

表 3 主汉位置与水沙匹配关系

Tab. 3 The relationship between the flow-sediment relation and the main channel location

时段	主汉位置	水沙匹配关系
1931-1944	右汉	无水文资料
1945-1951	左汉	无水文资料
1951-1971	左汉	沙 > 水
1971-1980	主流易位频繁	沙 > 水
1980-1994	左汉	沙 > 水
1994 年汛后至今	右汉	沙 < 水

需要注意的是,1971 年-1980 年间,监利河段的水沙过程虽然处于“沙多水少”期,主流易位的现象却频繁发生。很多研究表明^[26-30],裁弯工程对于上下游河势以及河床的演变都产生了巨大的影响。由于监利汉道位于中州子、上车湾两个裁弯工程之间,且离两个工程的距离都很近,因此,本河段也可以说处于裁弯工程区。陈凤云^[31]对比裁弯工程实施前后的监利河段在洪、枯两个流量下的实测水位发现,从 1971 年开始监利河段的水位较裁弯工程实施以前都有一个明显的下降,流量为 20 000 m³/s 时,1971 年的水位较 1966 年同流量级下的水位下降了 0.8 m;流量为 5 000 m³/s 水位下降更为明显,下降约 1.2 m。裁弯工程使得该河段的比降迅速增大,流速也相应增大,因此河段的两支汉道在裁弯工程实施后发生剧烈的冲淤交替,致使主流在两支汉道之间频繁易位。到 1980 年时,5 000 m³/s 流量下水位相对于 1966 年同流量的水位下降了 0.2 m,而 20 000 m³/s 流量时的水位相对于 1966 年的同流量的水位抬高了 0.2 m,这说明裁弯工程对于河床产生的影响已经逐渐恢复。由于“沙多水少”的水沙匹配关系仍在持续,因此 1980 年以后分汉河道的主汉

又重新回到左汉。

监利汉道为典型的弯曲性分汉河道,其演变过程也需要遵循弯道的规律。张植堂^[18]提出天然河湾水力轴线的曲率半径与流量及比降呈现指数关系,即:

$$R \propto \left(\frac{Q^2}{S} \right)^3 \quad (4)$$

黄河清建立的冲积河流的平衡理论^[32]提出,当河道达到稳定平衡时,其比降与河道的流量和输沙率呈现指数关系,即:

$$S \propto \frac{Q_s^{0.540}}{Q^{0.678}} \quad (5)$$

将式(5)带入式(4),得到,弯道水力轴线的曲率半径与河道的流量和输沙率之间的关系为:

$$R \propto \frac{Q^{0.8927}}{Q_s^{0.1753}} \quad (6)$$

式(6)说明,弯道水力轴线的曲率半径会随着流量的增大而增大,随着输沙率的增大而减小,且流量与输沙率对于曲率半径的影响程度不同,流量指数为 0.8927,对于曲率半径的影响更大,而输沙率的指数仅为 0.1753,使得输沙率对于弯道曲率半径的影响被忽略了。式(6)表明,弯道水流动力轴线会随着水沙匹配关系发生规律性的摆动,这可能引起弯曲分汉中的汉道水沙分配比例的调整,进而引起监利弯曲分汉河道发生主支汉易位。从挟沙水流的能量以及能耗角度来看,流量是河流输移泥沙、引起河床演变的重要能量组成,流量的大小意味着水流所挟带能量的高低,而河流输运泥沙需要消耗一部分能量,输沙率的大小则代表着能耗的多少。监利右汉曲率偏大,相对顺直,当挟沙水流处于“大水小沙”的“高能量”时期,由于惯性的作用,进入监利右汉的水沙比例高,因此右汉作为主汉;而当挟沙水流处于“小水大沙”的“低能量”时期,进入右汉的水沙比例减小,逐渐低于左汉的分流比,因此发生主支汉易位,左汉成为主汉。

5 结论

为了探讨水沙过程对于汉道主支汉易位的影响,本文采用时序距平分析法、Mann-Kendall 分析与基于分形理论的极差分析法相结合的方式,详细分析了监利河段 1951 年-2009 年来的流量、输沙率序列的变化过程。结果表明,监利站的流量及输沙率在 1 年长的时间尺度上均为分形式的布朗运动,流量和输沙率的 Hurst 数均十分接近 1.0,二者均存在很强的持续性。Mann-Kendall 突变分析结果表明,流量时序变量在 1967 年发生突变,输沙率

序列无明显的突变点。最重要的是,研究发现,该河段主汉的位置与水沙过程的持续性以及突变点并无明显的联系,而与来水来沙的匹配关系有关:在“水多沙少”时期,监利右汉为主汉,而在“沙多水少”的时期,监利左汉则演变为主汉。由于监利河道属于弯曲分汉型河道,水沙条件的变化会引起弯道的水动力轴线的曲率半径的变化,这可能是引起监利汉道水沙分配比例调整、甚至发生主支汉易位的主要原因。定量的揭示产生这一现象的物理机理与过程,有助于深化对汉道演变规律的认识,也是下一步研究的重点。

参考文献(References):

- [1] 谢鉴衡. 河床演变及整治[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990: 78. (XIE Jianheng. Fluvial processes and regulation [M]. Beijing: China Water & Power Press. 1990: 78. (in Chinese))
- [2] 中国科学院地理研究所, 长江水利水电科学研究院, 长江航道局规划设计研究院. 长江中下游河道特性及其演变[M]. 北京: 科学出版社, 1985. (Institute of Geography of CAS, Yangtze River Scientific Research Institute and Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute eds. The Channel Characteristics and Evolution in the Middle and Lower Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese))
- [3] Wang Z B, Fokink R J, De Vries, et al. A Stability of river bifurcations in 2D morphodynamic models[J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33, 739-750. DOI: 10.1080/00221689509498549.
- [4] Islam T G M, Kabir M R, Nishat A. Nodal point relation for the distribution of sediments at channel bifurcation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2006, 132, 1105-1109. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:10(1105).
- [5] 罗海超. 长江中下游分汉河道的演变特点及稳定性[J]. 水利学报, 1989(6): 10-19. (LUO Hai chao. Characteristics of fluvial processes and stability of the braided channel in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(6): 10-19. (in Chinese))
- [6] 黄莉. 监利河段水沙变化及其对该河段河床横断面形态影响机理研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2008. (HUANG Li. Variation of water and sediment loads and impacts on the transversal profile in Jianli Reach of the Changjiang River[D]. Wuhan: Thesis for Master of Engineering. Changjiang River Scientific Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [7] 黎礼刚, 郑文洋, 卢金友, 等. 下荆江监利河段近期河道演变与综合整治初探[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(5): 6-9. (LI Li gang, ZHENG Wen yang, LU Jin you, et al. Probe into recent fluvial evolution of lower Jingjiang Jianli river reach and comprehensive regulation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(5): 6-9. (in Chinese))
- [8] 徐宗学, 李占玲, 史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 121-128. (XU Zong xue, LI Zhan ling, SHI Xiao kun. Long Term trends of major climatic variables and runoff in the Shiyang River Basin[J]. Resources Science, 2007, 29(5): 121-128. (in Chinese))
- [9] 侯钦磊, 白红英, 任园园, 等. 50年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1505-1512. (HOU Qin lei, BAI Hong ying, REN Yuan yuan, et al. Analysis of variation in runoff of the main stream of the Weihe River and related driving forces over the last 50 years[J]. Resource Science, 2011, 33(8): 1505-1512. (in Chinese))
- [10] 门宝辉, 刘昌明, 夏军, 等. R/S分析法在南水北调西线一期工程调水河流径流趋势预测中的应用[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 568-573. (MEN Bao hui, LIU Chang ming, XIA Jun, et al., Application of R/S on forecast of runoff trend in the water exporting regions of the first stage project of the western route of the South to North Water Transfer Scheme[J]. Journal of Glaciology and Geocryology. 2005, 27(4): 568-573. (in Chinese))
- [11] 朱玲玲, 张为, 葛华. 三峡水库蓄水后荆江典型分汉河段演变机理及发展趋势研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 106-113. (ZHU Ling ling, ZHANG Wei, GE Hua. Evolution trend and causes of the typical braided middle Yangtze reach after Three Gorges reservoir impoundment[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 106-113. (in Chinese))
- [12] 朱勇辉, 黄莉, 郭小虎, 等. 三峡工程运用后长江中下游沙市河段演变与治理思路[J]. 泥沙研究, 2016(3): 31-37. (ZHU Yong hui, HUANG Li, GUO Xiao hu, et al. Analysis of processes and regulation of Shashi river reach in the middle reach of Yangtze River after the TGP operation[J]. Journal of Sediment Research, 2016(3): 31-37. (in Chinese))
- [13] 彭玉明, 阳立群, 杨晓刚. 荆江汉道分流分沙变化及特征分析[J]. 人民长江, 2008, 39(14): 62-64. (PENG Yu ming, YANG Li qun, YANG Xiao gang. Analysis on the adjustment and characteristic of water-sediment allocation in Jingjiang River[J]. Yangtze River, 2008, 39(14): 62-64. (in Chinese))
- [14] 蒋艳, 夏军. 塔里木河流域径流变化特征及其对气候变化的响应[J]. 资源科学, 2007, 29(3): 45-52. (JIANG Yan, XIA Jun. The hydrological characteristics of runoff and its response to climatic change in Tarim[J]. Resources Science, 2007, 29(3): 45-52. (in Chinese))
- [15] 秦伟, 朱清科, 刘广全, 等. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J]. 水利学报, 2010, 39(11): 1325-1332. (QIN Wei, ZHU Qing ke, LIU Guang quan, et al. Regulation effects of runoff and sediment of ecological conservation in the upper reaches of Beiluo River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 39(11): 1325-1332. (in Chinese))
- [16] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919-2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 155-163. (LI Er hui, MU Xing min, ZHAO Guang ju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919-2010[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 155-163. (in Chinese))
- [17] 张植堂, 林万泉, 沈勇健. 天然河湾水流动力轴线的研究[J]. 长江水利水电科学研究院院报, 1984(1): 47-57. (ZHANG Zhi tang, LIN Wan quan, SHEN Yong jian. An Approach on

- the Main Current Belt of Stream Flow in River Bend[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1984(1): 47-57. (in Chinese)
- [18] 钱宁, 张仁, 周德仁. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. (QIAN Ning, ZHANG Ren, ZHOU De ren. Fluvial Process Theory[M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese))
- [19] 熊治平, 邓良爱. 荆江关洲河段河道演变分析[J]. 人民长江, 1999, 30(5): 27-28, 39. (XIONG Zhi ping, DENG Liang ai. Evolution analysis on Guanzhou stretch of Jingjiang river[J]. Yangtze River, 1999, 30(5): 27-28, 39. (in Chinese))
- [20] 杨怀仁, 唐日长. 长江中游荆江变迁研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (YANG Hua ren, TANG Ri chang. The fluvial process of Jingjiang in middle Yangtze River[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese))
- [21] 郑惊涛. 弯曲分汊河段泥沙运动规律研究[D]. 重庆交通大学, 2008. ZHENG Jing-tao. Study on the Laws of Sediment Movement about the Bending Braided Reach. Thesis for Master of Engineering[D]. Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [22] 付中敏, 闫军, 刘怀汉. 长江中游监利河段河床演变与航道整治思路[J]. 水运工程, 2010(6): 100-107. (FU Zhong min, YAN Jun, LIU Hua han. River bed evolution and waterway regulation thought of Jianli section in the middle reach of the Yangtze River[J]. Port and Waterway Engineering, 2010(6): 100-107. (in Chinese))
- [23] Mandelbrot B. B., Wallis J. R. Robustness of the rescaled ranged R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence[J]. Water Resources Research, 1969, 5(5): 967-988.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术, 第二版[M]. 北京: 气象出版社, 2007. (WEI Feng ying. Method and technology for climatology statistics (2nd edition)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese))
- [25] 蒋艳, 周成虎, 程维明. 新疆阿克苏河流域年径流时序特征分析[J]. 地理科学进展, 2005, 24(1): 87-96. (JIANG Yan, ZHOU Cheng hu, CHENG Wei ming. Analysis on the characteristics of runoff time series in Akesu Basin[J]. Process in Geography, 2005, 24(1): 87-96. (in Chinese))
- [26] 冷魁. 下荆江系统裁弯对城陵矶至武汉河段的影响[J]. 长江科学院院报, 1991(3): 66-73. (LENG Kui. The effects of systematic cutoffs in the lower reaches of Jingjiang on the Chenglingji Wuhan reach in the middle Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1991, 8(3): 66-73. (in Chinese))
- [27] 段文忠. 下荆江裁弯与城陵矶水位抬高的关系[J]. 泥沙研究, 1993(1): 39-50. (DUAN Wen zhong. The relation between cutoffs in lower Jingjiang river and water level at Chenglingji[J]. Journal of Sediment Research, 1993(1): 39-50. (in Chinese))
- [28] 唐日长. 下荆江裁弯对荆江洞庭湖影响分析[J]. 人民长江, 1999, 30(4): 20-23. (TANG Ri chang. Impact of river bend cut offs of lower Jingjiang river on the river and Dongting lake[J]. Yangtze River, 1999, 30(4): 20-23. (in Chinese))
- [29] 潘庆葵. 下荆江人工裁弯30年[J]. 人民长江, 2001, 33(5): 27-29. (PAN Qing sui. Over 30 years about the artificial cut offs project on the lower Jingjiang River[J]. Yangtze River, 2001, 32(5): 27-29. (in Chinese))
- [30] 余文畴. 长江中游下荆江蜿蜒型河道成因初步研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(6): 9-13. (YU Wen chou. Preliminary study on forming condition of lower Jingjiang meandering channels of middle Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(6): 9-13. (in Chinese))
- [31] 陈风云. 长江中游窑监大河段河床演变分析[J]. 水道港口, 1996(3): 14-21. (CHEN Feng yun. Analysis of riverbed evolution of Yaojian channel in the middle reach of Changjiang River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1996, (3): 14-21. (in Chinese))
- [32] Huang H Q, Nanson G C. Hydraulic geometry and maximum flow efficiency as products of the principle of least action[J]. Earth Surface Processes and Land forms, 2000, 25: F16.