

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2021.0015

许琳娟,王远见,李军华,等.基于长序列的黄河下游游荡型河道河势演变[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):151-157,197. XU L J, WANG Y J, LI J H, et al. River regime evolution of the wandering channel in the lower Yellow River based on long sequence[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 151-157, 197. (in Chinese)

基于长序列的黄河下游游荡型河道河势演变

许琳娟¹, 王远见¹, 李军华¹, 赵万杰^{1,2}, 董伟军³

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 河海大学, 南京 210098; 3. 华北水利水电大学, 郑州 450046)

摘要: 分析黄河下游游荡型河道河势的时空演变规律, 为进一步认识黄河下游河道演变特征、开展河道整治提供理论支撑和实践价值。在系统收集、整理1960—2015年黄河下游游荡型河段典型断面的河势观测资料基础上, 利用 Mann Kendall 趋势检验和 Fisher 断点检验方法分析1960—2015年黄河下游游荡型河道典型断面多年平均河宽及主流线迁移速率变化情况。结果表明: 近60年黄河下游游荡型河道在平面形态上呈藕节状分布, 而其主流线调整速率的时空分布规律并不显著; 黄河下游于店断面、禅房断面是平面藕节状分布的关键节点, 将全河段划分为3段(第一段铁谢至于店断面, 河宽均值为1627 m; 第二段于店至禅房断面, 河宽均值为1477 m; 第三段禅房至高村断面, 河宽均值为1074 m)。

关键词: 平均河宽; 主流线迁移速率; Mann Kendall 趋势分析; Fisher 断点检测; 游荡型河道; 河势演变

中图分类号: TV 147 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



黄河下游河道按照平面形态可分为游荡型、过渡型和弯曲型等3个河段类型, 其中从河南省郑州市花园口附近到山东省济南市高村附近为游荡型河段^[1]。该河段突出特点是河床宽浅散乱、主流摆动不定、河势变化剧烈^[2], 严重威胁黄河下游的河道治理和防洪安全。开展黄河下游游荡型河道河势演变特征研究可为进一步认识河势演变规律、有针对性地提出控制河势措施、开展河道整治等提供理论支撑, 对黄河下游的防洪减灾具有重要的实践意义。

目前, 学者们针对黄河下游游荡型河道河势演变已做了大量的研究工作。钱宁等^[3]根据黄河下游游荡型实测资料, 对该河段河势演变、节点控制、游荡型河流形成原因以及河流的游荡指标进行了梳理和研究; 毕慈芬^[4]以花园口河段为研究对象, 分析了黄河下游河床形态发生变异的过程及其成因; 张瑞

瑾^[5]基于黄河下游河道边界条件的改变, 如三门峡水库的修建、黄河下游滩区的开发等, 对黄河下游游荡型河段的主槽演变进行了趋势分析和阐释。依据黄河下游多年的河势资料, 赵业安^[6]收集并绘制了1982年以前典型年份的河道河势图以及1949—1984年多年主流线迁移图, 为今后研究黄河下游的河势演变提供了基础资料。胡一三^[7]从工程整治的角度分析了游荡型河型的成因及河型转化, 研究了工程对于黄河下游游荡型河道河势演变规律的影响; 江恩惠等^[8]分别分析了黄河下游河道在枯水少沙系列以及丰水少沙系列情况下的河势演变, 总结了河势演变特点, 揭示了黄河下游河势演变的基本规律。韩其为^[9]、金德生等^[10]、陈懋平等^[11]分析了小浪底水库运用后黄河下游游荡型河道的河势变化以及深泓位置变化等情况。现有对黄河下游游荡型河道河势演变时空规律的研究多停留在

收稿日期: 2020-06-19 修回日期: 2020-08-25 网络出版时间: 2020-09-04

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200903.1713.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407403); 国家自然科学基金(51709123); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(HKY-JBYW-2018-03)

作者简介: 许琳娟(1984—), 女, 河南巩义人, 高级工程师, 博士, 主要从事河流泥沙、河床演变及河道整治研究。E-mail: xlj2121003@163.com

定性描述阶段,对河势变化特征的研究仍然存在一些争议。

本文在系统收集整理 1960—2015 年黄河下游游荡型河段(铁谢至高村)典型断面的河势观测资料基础上,分析河势变化的特征,结合 Mann-Kendall 趋势检测和 Fisher 断点检验,分别对断面年平均河宽、年均主流线迁移速率进行检测,以期找出游荡型河段河势的时空演变规律和关键节点,为黄河下游游荡型河道的河势稳定和河道整治工作提供支撑。

1 资料与方法

1.1 研究区域

黄河下游河道是指黄河桃花峪以下的河道(图 1),黄河干流河道长 786 km,流域面积为 2.3 万 km²。

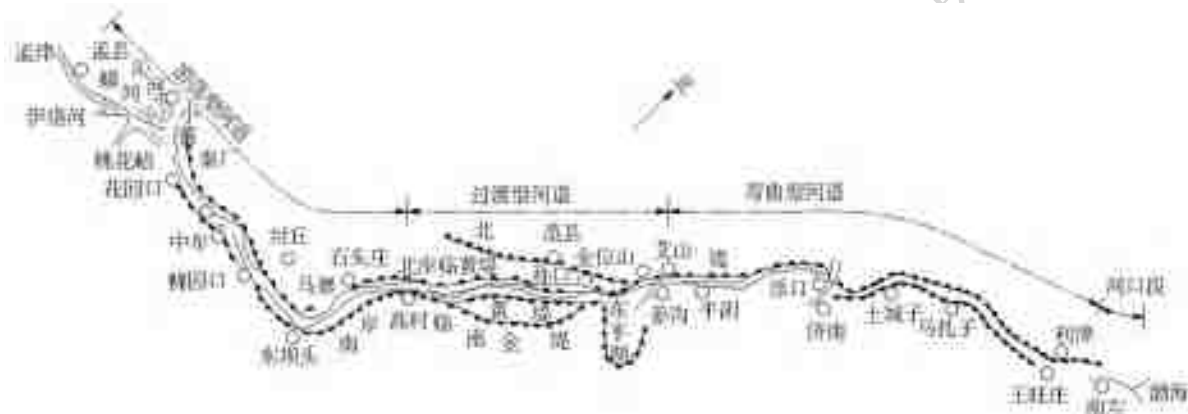


图 1 黄河下游河道
Fig.1 Lower Yellow River channel

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

本文系统搜集了 1960 年以来黄河下游游荡型河道铁谢至高村各典型断面的横断面形态数据,其中,1960—1997 年共有 53 个断面,1998—2015 年增加至 148 个。进而对这些大断面的横断面形态数据进行处理,用各断面左右嫩滩唇之间的距离表示河宽,并提取每个断面深泓点的坐标来计算主流线的迁移速率。

1.2.2 数据处理

学者们常采用以参数估计为主的各种趋势检验方法(累积距平法、线性倾向估计、滑动平均法等)来获得研究区域的某些变化特征,在水文数据资料的处理中尤为明显,且多用于对降水量的突变检验^[12-13],而对于非参数方法,如 Mann-Kendall 方法由于其自身优势近年来也被逐步广泛使用。非参数检验方法具有不受少数异常值的干扰等优点,因此

现状河床高出背河地面 4~6 m,形成典型的“地上悬河”,威胁下游河道和大堤安全。下游两岸堤防之间滩区面积约 3154 km²,居住人口 189.5 万人,洪水漫滩后,迁安救护任务繁重^[1]。按照河型特征,可将黄河下游自上而下划分为 3 个河段,分别为白鹤至高村的游荡型河段、高村至艾山的过渡型河段、艾山至利津的弯曲型河段(图 1)。黄河下游河道从上游到下游,其宽度逐渐缩窄,比降逐渐变缓,由 0.265‰ 减小到 0.100‰。其中,孟津白鹤至高村河段为典型的游荡型河段,全长约 299 km,河道纵比降在 0.170‰~0.265‰,一般情况下堤距宽 10 km,最宽处可达 24 km,河床断面宽浅,河槽宽度达 3~5 km,平滩流量下河相系数 $\sqrt{B/H}$ 值在 20~40,河道泥沙冲淤变化剧烈,河势游荡多变,洪水灾害非常严重,是黄河下游河道防洪的重点河段。

在长时间序列中更适合使用非参数检验方法对非正态分布的数据进行趋势检测,并结合其他方法进行突变检验^[14]。

(1) Mann-Kendall 趋势检验。Mann-Kendall (简称 M-K) 趋势检验法是一种广泛应用的非参数统计检验方法,具有数据样本不用服从某种分布、不受数据异常值的影响,且数据量化计算程度高、检测应用广、计算便捷等优点,多应用于类型变量以及顺序变量。

对于具有 n 个样本的序列 x ,构造秩序列

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, k = 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: s_k 为第 i 时刻 x 值大于第 j 时刻 x 值个数的累计数;当 $x_i > x_j$ 时, $r_i = 1$, 否则 $r_i = 0, j = 1, 2, \dots, i$ 。当时间序列随机独立时,定义统计量

$$UF_k = \frac{|s_k - E(s_k)|}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $E(s_k)$ 是 s_k 的均值; $\text{var}(s_k)$ 是 s_k 的方差; $UF_1 =$

Q, UF_k 为标准正态分布,它是按序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列。再按时间序列逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$), $UB_1 = 0$ 。给定显著性水平 α , 如 $\alpha = 0.05$, 临界值 $\alpha_{0.05} = \pm 1.96$, 将 UF_k 和 UB_k 两条统计曲线和 ± 1.96 两条临界线同时绘在同一个图上。如果 UF_k 线在临界线 ± 1.96 范围内变动, 则说明曲线的变化趋势和突变均不明显; 当 $UF_k > 0$ 时, 说明数据序列呈现出上升的趋势, 反之则相反。如果 UF_k 线超过临界线 ± 1.96 , 则说明数据序列呈现出显著的上升 ($UF_k > 0$) 或者下降 ($UF_k < 0$) 趋势^[15-18]。如果 UF_k 和 UB_k 2 条曲线在临界线 ± 1.96 内存在交点, 则交点对应的时刻即为数据序列开始突变的时间^[19]; 如果交点出现在临界线外或出现多个交点, 则要结合其他检验方法进一步判定是否为突变点。

本文利用 Matlab 软件实现 Mann-Kendall 趋势检验法编程, 分别给出 1960—2015 年黄河下游游荡型河道铁谢至高村河段间每个断面多年平均河宽与多年平均主流线迁移速率沿程分布的 Mann-Kendall 趋势检验曲线, 并进行规律分析。

(2) Fisher 断点检验。Fisher 断点检验是基于 Fisher 有序聚类法 (又称最优分割法) 而建立的, 它是聚类分析的一种^[20]。Fisher 有序聚类是指根据样本区间的相似性指标, 对按一定顺序排列的有序

样本进行分段, 不能打乱样本的排列顺序, 每个分段看作一个类, 类内差异总和尽可能小, 而各类之间的差异尽可能大^[21-24]。

设分类后的一组数据的子区间为 $\{a_i, a_{i+1}, \dots, a_j\}$, 则该子区间的样本均值为

$$\bar{a}_{ij} = \frac{1}{j-i+1} \sum_{i=1}^j a_i \quad (3)$$

有序聚类法以“类直径”表征类内的差异, 类内的差异越小, 类直径越小。Fisher 有序聚类法用“离差平方和”作为直径, 即

$$D_{ij} = \sum_{i=1}^j (a_i - \bar{a}_{ij})^2 \quad (4)$$

令 $j = 1, 2, \dots, n$, 即依次对于河宽, 主流线迁移速度等数据进行分类试算离差平方和, 利用 Matlab 软件绘制统计量曲线, 则曲线的最小值即对应时空断点。

2 结果分析

2.1 1960—2015 年断面多年平均河宽变化

图 2 给出了 1960—2015 年黄河下游多年平均的各段面河宽分布。根据结果可知: 黄河下游游荡型河道多年平均河宽为 1502 m; 年平均河宽最大值位于韦城断面附近, 为 3262 m; 最小值位于六合集断面附近, 为 477 m。多年平均河宽连续变化, 河道平面形态在空间上呈现出连续宽窄变化的藕节状分布。

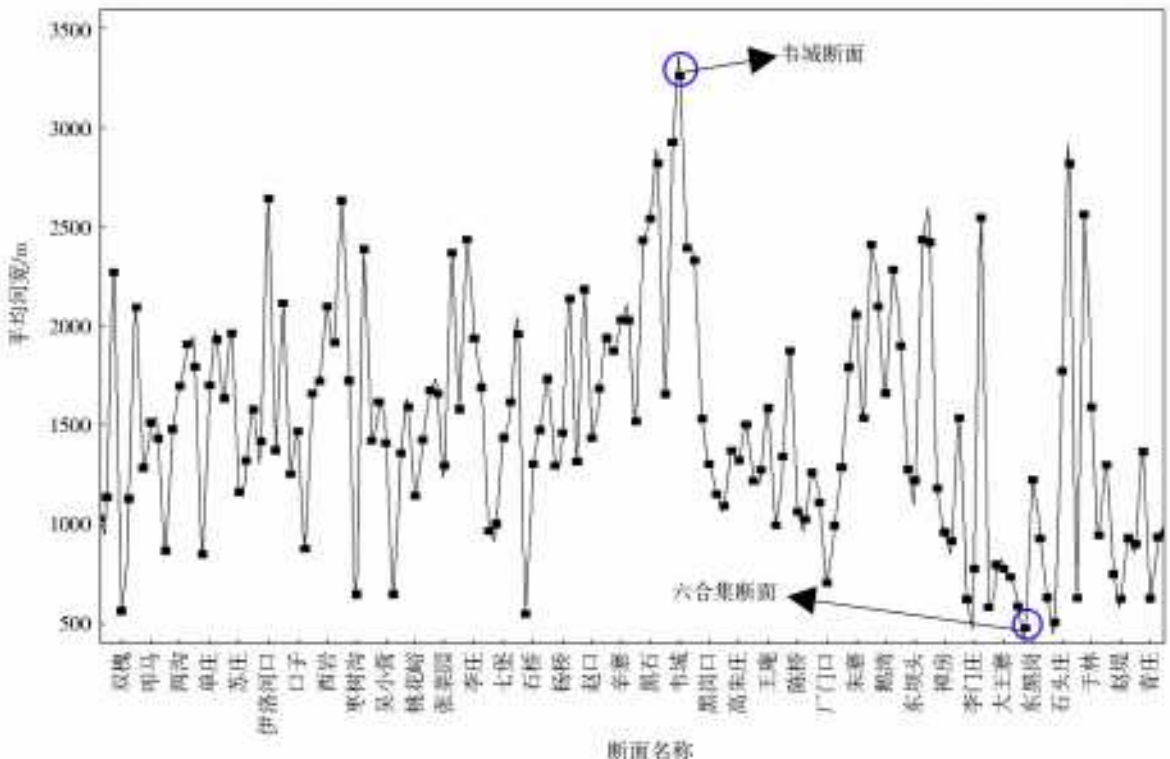


图 2 1960—2015 年黄河下游铁谢至高村河段平均河宽分布

Fig. 2 Average river width distribution of Tiexie Gaocun reach in the lower Yellow River from 1960 to 2015

图 3 给出了 1960—2015 年黄河下游游荡段每个断面平均河宽的 M-K 趋势检测。由图 3 可知: 根据数据的 U F 线统计结果, 前 130 个断面基本上都在临界线 ± 1.96 间上下波动, 说明绝大多数断面多年平均河宽整体上年变化趋势和突变不太明显, 大致保持在一个相对稳定的状态; 前 119 个断面中绝大部分 U F 线 > 0 , 表明多年平均河宽年变化呈现增加趋势。其中: 在 100 至 105 断面处以及 119 断面及其以后断面, 其 U F 线 < 0 , 表明这些断面的多年平均河宽年变化呈现减小趋势; 在 33 至 35 断面附近, 以及 76 至 88 断面附近, 其 U F 线超过临界线 $+ 1.96$, 表明在这些断面处其多年平均河宽年变化明显增加; 在 130 至 132 断面处以及 138 至 148 断面处, 其 U F 线超过临界线 $- 1.96$, 表明在这些断面处其多年平均河宽年变化明显减小。

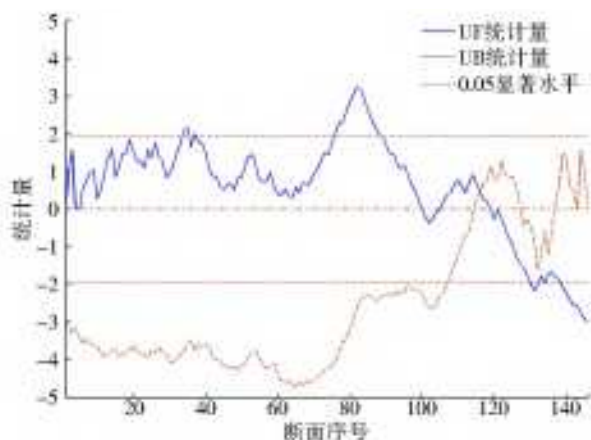


图 3 1960—2015 年黄河下游铁谢至高村多年平均河宽 M-K 趋势分析

Fig. 3 M-K trend analysis of average river width of Tiexie Gaocun in the lower Yellow River from 1960 to 2015

图 3 中 U F 线和 U B 线在临界线内出现一个交点(在 115 雷集断面和 116 禅房断面之间), 判断此点为突变点。为了验证这一点, 结合 Fisher 断点检测法来进一步判定突变点。

图 4 给出了 1960—2015 年黄河下游游荡段每个断面多年平均河宽的 Fisher 断点检测结果。图中在 116 禅房断面出现最低点, 即突变点, 这与 M-K 检测结果比较一致, 同时在 83 于店断面出现次低点, 说明在这些地方多年平均河宽也出现变化。

结合 M-K 曲线和 Fisher 曲线结果, 可知在 116 断面禅房附近出现明显断点, 说明在该断面之前断面多年平均河宽整体上呈现不断加宽的趋势, 在此断面之后断面多年平均河宽呈现减小的趋势, 即断面河宽明显萎缩。同时, Fisher 曲线在 83 断面于店附近也出现显著断点, 这同样是藕节状分布的一个显著节点, 说明前后河道的河宽均值有较大差异。

综上, 从多年河宽均值分析来看, 禅房断面和于店断面将全河段划分为 3 段: 第一段, 铁谢至于店断面, 河宽均值为 1627 m, 且沿程河宽呈显著上升趋势; 第二段, 于店至禅房断面, 河宽均值为 1477 m, 沿程河宽变化无显著趋势; 第三段, 禅房至高村断面, 河宽均值为 1074 m, 沿程河宽呈显著下降趋势。

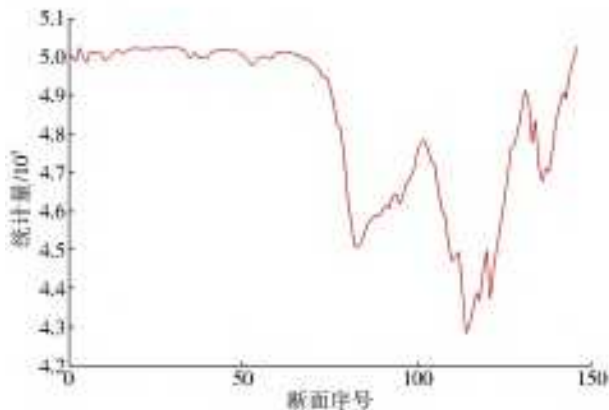


图 4 1960—2015 年黄河下游铁谢至高村河宽 Fisher 断点检测
Fig. 4 Fisher break point detection of Tiexie Gaocun river width in the lower Yellow River from 1960 to 2015

2.2 1960—2015 年主流线迁移速率空间变化

图 5 给出了 1960—2015 年黄河下游各断面主流线迁移速率的空间分布图。其中正值表示河道断面深泓点向左岸移动, 负值表示向右岸移动。向左岸偏移的最大值位于 94 断面王庵附近, 约为 27.49 m/a; 向右岸偏移的最大值位于 65 断面三坝附近, 约为 27.09 m/a。全河段平均迁移速率为 0.10 m/a。

图 6 给出了 1960—2015 年黄河下游游荡段铁谢至高村断面主流线迁移速率平均空间分布的 M-K 趋势检测结果。从图 6 可以看出, U F 线基本上都在临界线 ± 1.96 以内变化, 表明多年平均主流线迁移曲率变化趋势和突变不明显, 除个别断面 U F 线 < 0 外, 其余断面 U F 线均 > 0 , 说明大部分情况下迁移速率呈增加趋势。U F 线和 U B 线在临界线内有多个交点, 3 下古街断面至 11 东光断面之间出现 6 个交点, 48 老田庵断面至 53 岗李断面出现 5 个交点, 56 破车庄断面至 59 双开断面之间出现 3 个交点, 65 三坝断面出现交点, 130 东黑岗断面至 135 马寨断面出现 3 个交点, 由于出现多个交点, 不能判别突变点, 需结合 Fisher 断点检测来进一步判断突变点。

图 7 是 1960—2015 年黄河下游游荡段铁谢至高村断面主流线平均迁移速率空间分布的 Fisher 断点检测结果。从图 7 可以看出, 27 朱家庄断面、30 小马村断面、45 秦厂 2 断面、65 三坝断面、88 聂

庄断面、93 樊庄断面为 6 个低点。图 6 中 M-K 检测出现的多个交点中,只有 65 三坝断面在图 7 Fisher 断点检测中是低点,故这里判断 65 三坝断面

为突变点;图 7 Fisher 断点检测中 93 樊庄断面为最低点,图 5 中 94 断面为主流线向左岸偏移的最大值处,两者结合考虑可判断 93 樊庄断面也为突变点。

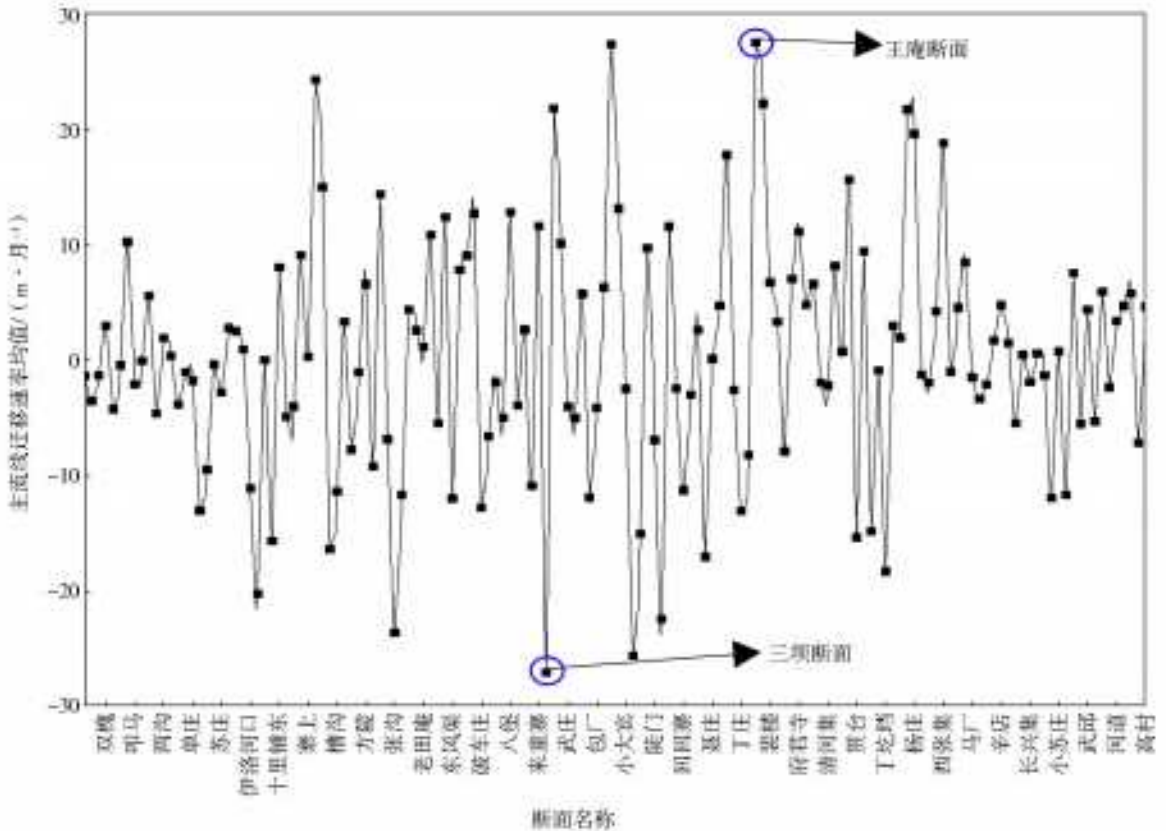


图 5 1960—2015 年黄河下游铁谢至高村河道平均迁移速率分布

Fig. 5 Distribution of average migration rate of Tiexie Gaocun river course in the lower Yellow River from 1960 to 2015

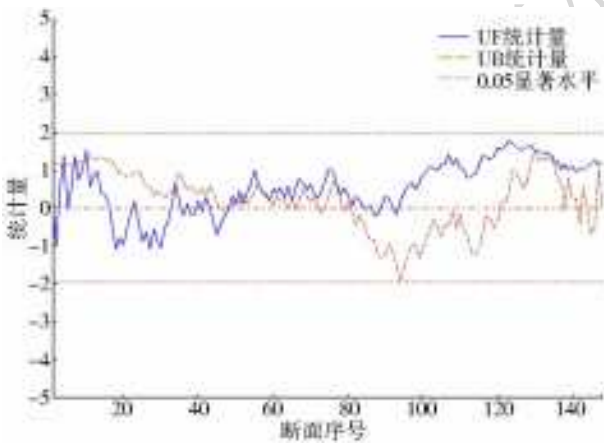


图 6 1960—2015 年黄河下游铁谢至高村河道迁移速率均值 M-K 趋势检测

Fig. 6 Detection of mean value M-K trend of migration rate of Tiexie Gaocun river course in the lower Yellow River from 1960 to 2015

从主流线多年平均迁移速率分析,65 三坝断面、93 樊庄断面将全河段划分为 3 段。第一段铁谢至三坝断面,主流线迁移速率均值为-1.31 m/月,且沿程变化趋势先增大后减小,最后逐渐增大,主流线位置整体向右岸偏移;第二段为三坝至樊庄断面,主流线迁移速率均值为-0.89 m/月,沿程变化增

大,且增加趋势不太明显,主流线位置整体仍向右岸略微偏移;第三段为樊庄至高村断面,主流线迁移速率均值为 2.27 m/月,沿程变化趋势增大,相比第二段,此段增加趋势略微明显,主流线位置整体向左岸偏移。由此可见,近 60 年黄河下游游荡型河段主流线迁移速率变化趋势在空间上的没有呈现出明显的藕节状分布规律。

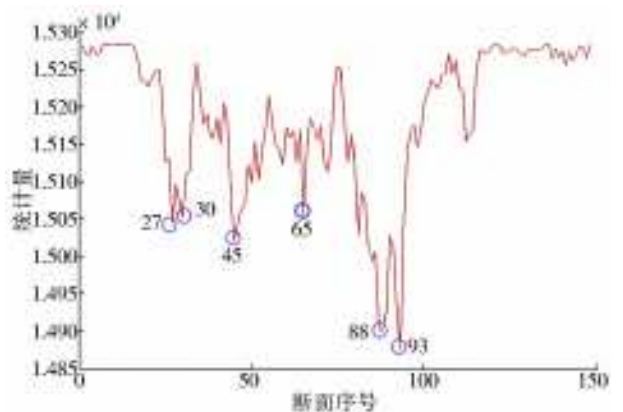


图 7 1960—2015 年黄河下游铁谢至高村迁移速度 Fisher 断点检测

Fig. 7 Fisher breakpoint detection of migration speed of Tiexie Gaocun in the lower Yellow River from 1960 to 2015

依据黄河下游游荡型河道铁谢至高村断面的实测数据,从空间角度对多年平均河宽、主流线迁移速率进行趋势与突变分析,河道平面形态呈现出宽窄相间的藕节状分布,这与韩琳等^[25]通过遥感影像监测到的黄河游荡段平面形态一致,同时根据河宽均值及变化趋势,在整体上将黄河游荡段分为3段,于店断面、禅房断面为其拐点。从断面多年平均主流线迁移速率变化趋势来看,没有表现出明显的空间藕节状分布规律,根据突变检测结果,三坝断面和樊庄断面为突变点。

3 结论

黄河下游游荡型河段在平面形态上呈藕节状分布,而其主流线调整速率变化趋势的空间分布规律并不显著。

从分段节点看,于店断面、禅房断面附近是黄河下游河道平面藕节状分布的关键节点。在禅房断面之前,黄河下游游荡型河道断面多年平均河宽整体上呈现不断加宽的趋势;在禅房断面之后,断面多年平均河宽呈现减小的趋势,即断面河宽明显萎缩。

黄河下游游荡段主流线迁移速率变化相对较为规律,沿程具有逐渐增加的趋势,三坝断面、樊庄断面是主流线迁移速率变化的关键节点。

该研究结果仅是利用突变检测方法得到的一些认识,后期将结合黄河下游实际情况以及出现突变的原因进行详细分析,不仅是对该结果的一个检验,也是对黄河下游河道河势演变的进一步认识。

参考文献(References):

- [1] 胡一三,江恩慧,曹常胜,等.黄河河道整治[M].北京:科学出版社,2020.(HU Y S,JIANG E H,CAO C S,et al. Yellow River channel improvement[M]. Beijing: Science Press,2020.(in Chinese))
- [2] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987.(QIAN N,ZHANG R,ZHOU Z D. Fluvial evolution[M]. Beijing: Science Press,1987.(in Chinese))
- [3] 钱宁,周文浩.黄河下游河床演变[M].北京:科学出版社,1965.(QIAN N,ZHOU W H. Riverbed evolution in the lower Yellow River[M]. Beijing: Science Press,1965.(in Chinese))
- [4] 毕慈芬.黄河下游游荡型河段型态变异成因的探讨[C]//黄河水利委员会水利科学研究所研究论文集(第一集,泥沙·水土保持).郑州:河南科学技术出版社,1989:27-37.(BI C F. Discussion on the causes of formation variation of wandering reach in the lower Yellow River[C]//Research papers of Institute of water resources of Yellow River Commission (Volume I, sediment and soil conservation). Zhengzhou: Henan Science and Technology Press,1989:27-37.(in Chinese))
- [5] 张瑞瑾.关于黄河下游游荡型河段今后的演变趋势[C]//张瑞瑾论文集.北京:中国水利水电出版社,1996:326-331.(ZHANG R J. Evolution trend of wandering reach in the lower Yellow River[C]//Collected papers of Zhang Ruijin. Beijing: China Water & Power Press,1996:326-331.(in Chinese))
- [6] 赵业安.黄河下游现代河道演变图[R].郑州:黄河水利科学研究院,1986.(ZHAO Y A. Modern channel evolution of the lower Yellow River[R]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Research Institute,1986.(in Chinese))
- [7] 胡一三.“黄河下游游荡型河段整治研究”综述[J].人民黄河,1996(10):5-15.(HU Y S. Summary of "study on regulation of wandering reach in the lower Yellow River"[J]. Yellow River,1996(10):5-15.(in Chinese))
- [8] 江恩惠,曹常胜,曹永涛,等.黄河下游游荡型河段河势演变规律[J].人民黄河,2009,31(5):26-28.(JIANG E H,CAO C S,CAO Y T,et al. Law governing the changes in wandering plane form of the lower Yellow River[J]. Yellow River,2009,31(5):26-28.(in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.05.010.
- [9] 韩其为.对小浪底水库修建后黄河下游游荡型河段河型变化趋势的几点看法[J].人民黄河,2002(4):9-10.(HAN Q W. Some views on changing trend of wandering reach type of the lower Yellow River after completion of Xiaolangdi reservoir[J]. Yellow River,2002(4):9-10.(in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2002.04.005.
- [10] 金德生,张欧阳,陈浩,等.小浪底水库运用后黄河下游游荡型河段深泓演变趋势分析[J].泥沙研究,2000(6):52-62.(JIN D S,ZHANG O Y,CHEN H,et al. Analysis of thalweg evolution tendency of the wandering reach in the lower Yellow River after Xiaolangdi reservoir operation[J]. Journal of Sediment Research,2000(6):52-62.(in Chinese)) DOI: 10.1623/9/j.cnki.0468-155x.2000.06.009.
- [11] 陈懋平,马荣曾.小浪底水库运用后黄河下游游荡型河段河道整治方案适应性分析及对策[J].人民黄河,1999(3):15-17,49.(CHEN M P,MA R Z. Suitability analysis of harness plans of shifting channel in the

- lower Yellow River after operation of Xiaolangdi reservoir and corresponding treatments [J]. Yellow River, 1999(3): 15-17, 49. (in Chinese)
- [12] 李艳春,李艳芳. 宁夏近百年来气候变化及突变分析[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 100-104. (LI Y C, LI Y F. Period and jump analyses of climatic variation in Ningxia in recent hundred years [J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(1): 100-104. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0534.2001.01.017.
- [13] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 577-583. (YANG L M. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 577-583. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2003.04.012.
- [14] 孔兰,谢江松,陈晓宏,等. 珠江口最高洪潮水位的变化规律研究[J]. 水资源研究, 2012, 1(5): 315-319. (KONG L, XIE J S, CHEN X H, et al. Research on changes of peak water level in the Pearl River estuary [J]. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(5): 315-319. (in Chinese))
- [15] 谢菲,于延胜,路宾朋. 老河口市近 57 年来气候变化特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009(4): 81-85. (XIE F, YU Y S, LU B P. On the climatic changes of Laohekou City in last 57 years [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2009(4): 81-85. (in Chinese)) DOI: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2009.04.011.
- [16] 赵嘉阳,郭福涛,梁慧玲. 福建长汀红壤区 1965—2013 年气温和降水量的变化趋势[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016(1): 77-83. (ZHAO J Y, GUO F T, LIANG H L. Changes in temperature and precipitation in Changting of Fujian Province during 1965-2013 [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science), 2016(1): 77-83. (in Chinese)) DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2016.01.013.
- [17] 毕远杰. 基于 Mann Kendall 的汾河水库年径流量变化研究[J]. 水资源开发与管理, 2018(8): 53-55. (BI Y J. Study on annual runoff change of Fenhe reservoir based on Mann Kendall [J]. The Global Seabuckthorn Research and Development, 2018(8): 53-55. (in Chinese)) DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2018.08.12.
- [18] 王晓艳. 濮阳市近 56 年降水变化趋势及周期分析[J]. 河南科技, 2018(11): 158-160. (WANG X Y. Precipitation change trend and cycle analysis of Puyang City in recent 56 years [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2018(11): 158-160. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-5168.2018.11.076.
- [19] 程萌, 巩在武. 1957—2014 年巨野县气候变化特征分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015(5): 721-724. (CHENG M, GONG Z W. Analysis on the characteristics of climate changes in Juye County from 1957 to 2014 [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2015(5): 721-724. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2015.05.014.
- [20] 武琳琳. 基于 Fisher 最优分割法的聚类分析应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2013. (WU L L. Application of cluster analysis based on Fisher optimal segmentation method [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013. (in Chinese))
- [21] 张晗. 基于虚拟仪器的汽轮机性能试验系统研制及应用[D]. 华北电力大学, 2016. (ZHANG H. Development and application of steam turbine performance test system based on virtual instrument [D]. North China Electric Power University, 2016. (in Chinese))
- [22] 饶宛,方立军,张晗,等. 基于 Fisher 有序聚类的汽轮机试验数据稳态检测方法[J]. 电站系统工程, 2016(1): 64-66. (RAO W, FANG L J, ZHANG H, et al. Steady state detection of turbine performance test data based on Fisher ordered clustering method [J]. Power System Engineering, 2016(1): 64-66. (in Chinese))
- [23] 俞萍,池宏,谭迎春,等. 基于 Fisher 聚类算法的航班飞行高度偏差分析研究[J]. 中国管理科学, 2010(5): 130-136. (YU P, CHI H, TAN X C, et al. A study on flight altitude discrepancy base on the Fisher ordinal samples cluster method [J]. Chinese Journal of Management Science, 2010(5): 130-136. (in Chinese)) DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2010.05.004.
- [24] 李湘宁,王健. 相关性分析在一致性检验中的应用[J]. 战术导弹技术, 2012(3): 60-62, 68. (LI X N, WANG J. Application of correlation analysis in consistency test [J]. Tactical Missile Technology, 2012(3): 60-62, 68. (in Chinese)) DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.2012.03.006.
- [25] 韩琳,张艳宁,刘学工. 黄河下游河道藕节形态特征遥感监测研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(10): 24-25, 28. (HAN L, ZHANG Y N, LIU X G. Study on characteristics of Loins root joint shape channel of the lower Yellow River through remote sensing [J]. Yellow River, 2010, 32(10): 24-25, 28. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2010.10.010.

(下转第 197 页)

10. 1061/(asce) is. 1943555x. 0000155.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 市政工程投资估算编制办法[R/ OL]. (2020 06-27) [2020 05 19]. <https://wenku.baidu.com/view/d05b905c25c52cc58bd6be5e.html>. (Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Preparation method for investment estimation of municipal engineering[R/ OL]. (2020 06-27) [2020 05 19]. <https://wenku.baidu.com/view/d05b905c25c52cc58bd6be5e.html>. (in Chinese))
- [21] 韩珀, 高红涛, 刘春霞, 等. 南水北调水源对水厂现状工艺的适应性研究[J]. 供水技术, 2015, 9(3): 48-52. (HAN P, GAO H T, LIU C X, et al. Adaptability of water source from the South to North Water Diversion Project on present process in waterworks[J]. Water Technology, 2015, 9(3): 48-52. (in Chinese))
- [22] 上海市市政工程设计研究院. 给水排水设计手册: 第三册城镇给水[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. (Shanghai Municipal Engineering Design Institute. Water supply and drainage design manual urban: water supply[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese))
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市给水工程规划规范: GB 50282—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. (Ministry of housing and urban rural development of the people's Republic of China. Code for urban water supply engineering planning: GB 50282—2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2017. (in Chinese))
- [24] 邵迎, 姚峻嵘. 混凝除藻在常规工艺自来水厂中的应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(21): 47-49. (SHAO Y, YAO J R. Application of coagulation for algae removal in waterworks using conventional treatment process[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(21): 47-49. (in Chinese))
- [25] 周律. 给水排水工程技术经济与造价管理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (ZHOU L. Technical economy cost management of water and wastewater engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))

Standardized construction cost estimation models for drinking water treatment plant

MA Keke¹, WANG Qi¹, ZHOU Lyu¹, SUN Fu¹, CHEN Yumin², XU Yixing², HUANG Xinli²

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Chengdu Environment Group Co., Chengdu 610041, China)

Abstract: Standardized construction cost estimation models based on the regression analysis method were established, including the unit structure cost model and the water plant equipment purchase cost model, and combined with the water plant water intake head, other types of buildings and general floor layout cost analysis and engineering construction and other expenses and reserve costs were estimated for the cost of the water plant. According to the actual project, the obtained model was verified. The estimated errors of the construction cost of the unit structure were all controlled within 30%, which meet the accuracy of control requirements of the project proposal stage, the actual equipment purchase cost was - 11.30% of the estimated error, the overall cost estimation error rate of the water plant cost was only 4.03%. The cost model of the water plant based on regression analysis can be applied to estimate the cost of a water plant rapidly and ensure good estimation accuracy.

Key words: water plant; project cost; regression analysis; equipment purchase; cost estimation model

(上接第 157 页)

River regime evolution of the wandering channel in the lower Yellow River based on long sequence

XU Linjuan¹, WANG Yuanjian¹, LI Junhua¹, ZHAO Wanjie^{1,2}, DONG Weijun³

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The temporal and spatial evolution law of the wandering river regime in the lower Yellow River was analyzed to provide theoretical support and practical value for further understanding the evolution characteristics of the lower Yellow River channel. Based on the systematic collection of river regime observation data of typical sections of the wandering channel in the lower Yellow River from 1960 to 2015, with the Mann Kendall trend test and Fisher breakpoint test method, the average river width and the migration rate of the mainline of the wandering channel in the lower Yellow River from 1960 to 2015 were analyzed. The results show that: in the past 60 years, the wandering channel in the lower Yellow River showed a clear manifestation, that was, they were distributed in the shape of a lotus on the plane, while the temporal and spatial distribution of the main line adjustment rate was not significant; the cross section of the lower Yellow River was the key node of the plane lotus shaped distribution, and the whole river channel was divided into three sections (the first reach, Tiexie Yudian section, with the average river width of 1627 m; the second reach, Yudian Chanfang section, with the average river width of 1477 m; the third reach, Chanfang Gaocun section, with the average river width of 1074 m, respectively).

Key words: average river width; mainstream line migration rate; Mann Kendall trend analysis; Fisher breakpoint detection; wandering channel; river regime evolution