



冲积河流系统形态的参数化判别方法^{*}

邓中辉¹, 岳艳召², 刘鹏飞³

- (1. 交通运输部长江航务管理局, 湖北 武汉 430014;
 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290;
 3. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

摘要: 冲积河流行进过程中受到阻力时, 河道的水力参数、形状参数将产生一系列变化以建立河流的相对平衡态, 适应不同的水沙条件, 由此产生了不同的河型。根据达西公式, 运用试验法和量纲分析法得出无量纲的河道纵向、横向稳定指标; 并基于阻力规律, 通过引入河型参数和公式变形, 提出采用综合稳定指标作为河型判定参数。通过天然河流资料的数据分析可知, 所提出的河型参数可通过若干河流水力参数区分不同河型。

关键词: 阻力规律; 河型; 参数化; 分类

中图分类号: U 617; TV 143

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0185-06

Parametric discrimination method for morphology of alluvial river system

DENG Zhong-hui¹, YUE Yan-zhao², LIU Peng-fei³

- (1. Changjiang River Administration of Navigational Affairs, M.O.T., Wuhan 430014, China;
 2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;
 3. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T, Tianjin 300456, China)

Abstract: When alluvium river is subjected to resistance, the hydraulic and pattern parameters of the river will produce a series of changes to establish a relative equilibrium state to adapt to different water and sediment conditions, resulting in the emergence of different river patterns. According to Darcy's formula, the dimensionless longitudinal and transverse stability index of the river are obtained with experimental and dimensional analysis method, and the comprehensive stability index is obtained as the river pattern judgment parameter by introducing the river pattern parameters and the deformation of the formula based on the resistance rule. Data analysis of natural river data shows that the proposed river type parameters can distinguish different river patterns by several river hydraulic parameters.

Keywords: resistance rule; river pattern; parameterization; discrimination

认识和判别河流形态是认识和研究河流形成、演变过程的基础, 河流发展过程的实质就是河流各种特征参数的变化过程^[1]。冲积河流通常分为单线型和多线型。顺直型、蜿蜒型河流被归类为单线型, 蜿蜒型河流因为有较大的曲率而区别于顺直河流。Eaton 等^[2]认为顺直型和蜿蜒型河流之间并没有本质的区别, 只是顺直河道只通过单一

的改变粒径的途径来维持稳定, 而蜿蜒型河流则通过调整坡降和粒径来维持稳定性。通常认为辫状河流是多线型河流。之后出现的一些分类方法可以从影响因素方面更好地解释河流形态, Xin 等^[3]将分汊型河流划分为多线型河流。本文将河流分为单线型和多线型, 顺直型和蜿蜒型河流归为单线型河流进行研究, 分汊型和辫状河流归为多线

收稿日期: 2022-04-12

*基金项目: 交通运输部长江航务管理局三峡后续工作科研项目(SXHGXZ-2020-4)

作者简介: 邓中辉(1986—), 男, 硕士, 工程师, 从事枢纽通航与航道研究。

通讯作者: 刘鹏飞(1985—), 男, 硕士, 副研究员, 从事航道整治研究。E-mail: tiankou77@163.com

型河流。

对于河型的分类方法，一类使用微观或宏观方程描述河流系统，例如 Leopold 等^[4] 和 Parker^[5] 所做的研究。另一类基于天然或实测数据，采用统计或经验方法建立河流系统中几个变量的函数关系，例如 Carson^[6]、Begin^[7] 所做的研究。本文基于已知规律，利用天然河流数据推求河流系统形态分类方法，提出了一种量纲和谐、计算简便、适用范围广的河型判别方法。

1 河床稳定性指标

河床演变是指河道在自然或人为干预时所发生的变化，就其表现形式而言，可分为纵向变形和横向变形^[8]。河道之所以形成不同的河型，主要是河床的稳定程度不同所致^[9]。研究影响河床稳定性因素可得到河床综合稳定指标，进而利用该指标作为参数区分不同河型。反过来，利用已有观测资料，通过计算河床稳定性指标，可以为预测河床平面变形的发展趋势和河道演变的类型提供指导。

尼古拉兹实验根据人工粗糙管的试验结果揭示了有压管流的阻力规律。之后，达西-魏斯巴赫公式被应用于明渠水流中，公式模拟了河道粗糙度、河道几何形状和流速之间的关系。对于给定长度的明渠，平均流速自由液面水流公式一般形式为：

$$h_f = \lambda \cdot \frac{l}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

式中： h_f 为由于阻力产生的水头损失 (m)； l 为给定明渠长度 (m)； R 为明渠水力半径 (m)； v 为自由液面平均流速 (m/s)； g 为当地重力加速度 (m/s^2)； λ 为无量纲的沿程阻力系数。

令 $S^* = h_f/l$, $v = Q/\omega$, 代入式(1)得：

$$S^* = \frac{h_f}{l} = \lambda \left(\frac{Q}{\omega \sqrt{8gR}} \right)^2 = \lambda Q^{*2} \quad (2)$$

即：

$$\lambda = \frac{S^*}{Q^{*2}} \quad (3)$$

式中： Q 为明渠平均流量 (m^3/s)； ω 为明渠过水

断面面积 (m^2)； S^* 为河道坡降； $Q^* = \frac{Q}{\omega \sqrt{8gR}}$ ，无量纲。

尼古拉兹实验结果表明，雷诺数 Re 较大时，对沿程阻力系数 λ 的影响可忽略，只与相对粗糙度 R/Δ 有关。对于天然河流，雷诺数较大，其对沿程阻力系数 λ 的影响可忽略，水流的阻力系数主要与河流的含沙量和河床河岸沉积物粗糙程度有关。除此之外，还应存在一个表示河流形态的参数 φ 影响水流阻力系数，即：

$$\lambda = f\left(\frac{R}{\Delta}, \varphi\right) \quad (4)$$

式(4)结合式(3)则有：

$$\frac{S^*}{Q^{*2}} = f\left(\frac{R}{\Delta}, \varphi\right) \quad (5)$$

存在函数 ψ 使得：

$$\varphi = \psi\left(\frac{R}{\Delta}, \frac{S^*}{Q^{*2}}\right) \quad (6)$$

天然河流中一般有： $b \gg h$

故有 $R \approx h$ 。将式(3)代入式(6)得：

$$\varphi = \psi\left(\frac{JQ^2}{8gb^2h^3}, \frac{h}{\Delta}\right) \quad (7)$$

天然河流中河岸和河床的物质组成差别很大，然而，由于天然河流河岸沉积物资料匮乏，故假设河岸和河床沉积物的粒径组成相同。在研究水流摩阻等相关问题时，选用床沙中值粒径 d_{50} 作为代表粒径^[10]，式(7)变形为：

$$\varphi = \psi\left(\frac{JQ^2}{8gb^2h^3}, \frac{h}{\epsilon d_{50}}\right) \approx \psi\left(\frac{JQ^2}{8gb^2h^3}, \frac{h}{d_{50}}\right) \quad (8)$$

冲积河流的形态主要取决于河床的纵向和横向稳定性^[11]，河床的纵向稳定性受床沙运动引起河床纵向变形的影响。对床面附近含沙水流进行微观受力分析，以直径为 d_s 的单颗粒泥沙作为球心，由水膜包裹而成的、直径为 d 的球体作为研究对象，密度为：

$$\rho' = \frac{\rho(d^3 - d_s^3) + \rho_s d_s^3}{d^3} \quad (9)$$

其所受拖曳力 F_D 和阻力 f 分别为：

$$F_D = \alpha_1 d^2 \frac{\rho' u^2}{2} \quad (10)$$

$$f = \mu \left[\alpha_2 (\rho_s - \rho) d^3 - \alpha_3 d^2 \frac{\rho' u^2}{2} \right] \quad (11)$$

研究对象所受阻力和拖曳力比值为:

$$\frac{f}{F_D} = A \frac{(\rho_s - \rho) d}{\rho' u^2} - B \quad (12)$$

其中 A、B 为常数, 则:

$$\frac{f}{F_D} \sim \frac{(\rho_s - \rho) d}{\rho' u^2} = \frac{(\rho_s - \rho) d^4}{c^2 h J [\rho (d^3 - d_s^3) + \rho_s d_s^3]} \quad (13)$$

对于床沙附近水流: $d \approx d_s$, 则:

$$\frac{f}{F_D} \sim \frac{(\rho_s - \rho) g d}{\rho' u^2} = \frac{(\rho_s - \rho) g d_s}{c^2 h J \rho_s} \quad (14)$$

式中: 对于天然泥沙, $\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s}$ 基本为常数, 则 $\frac{f}{F_D} \sim \frac{d_s}{h J}$ 。

$\frac{d_s}{h J}$ 是影响床沙能否随水流运动的重要因素, 可作

为衡量纵向冲淤即河床纵向稳定的指标 δ'_h , 即:

$$\delta'_h = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{d_{50}}{h J} \quad (15)$$

对于天然泥沙, 比重 $(\rho_s - \rho)/\rho$ 为常数, 一般在 2.60~2.75, 在作为稳定性指标的参变数中可以略去不计^[12], 故纵向稳定系数 δ_h 表示为:

$$\delta_h = \frac{d_{50}}{h J} \quad (16)$$

结合式(12), 剩余的影响河流形态的元素将组成横向稳定指标:

$$\delta_b = (Q^2)^w (b^2)^x (h^3)^y g^z \quad (17)$$

其中 w 、 x 、 y 、 z 待确定。

2 试验部分

2.1 试验装置

河流的横向稳定性与河岸稳定密切相关。河道展宽和弯曲是河岸受到水流冲刷不断崩塌的结果, 展宽的速率和曲率能够反映河岸抵抗水流冲刷的能力。试验中通过调整影响因素、监控不同时间点的河流形态、测量河道展宽速率和曲率研究流量和初始河宽对横向稳定性的影响。

试验在室内水池中进行, 水池的尺寸为 4.0 m×2.0 m×0.3 m(长×宽×深), 水槽坡度可调节。进口流量采用恒定清水下泄, 由流量开关进行无级调节, 流量由体积法测得。河道入口处设有消能

栅, 对入口处水流进行消能。水池尾部设有水箱, 内有沉沙桶, 挾沙水流在桶内沉降后进入水箱, 再经输水管道泵入试验河道, 形成水流的自循环。试验采用中值粒径 $d_{50}=0.62$ mm 的天然均匀沙作为床沙, 铺设厚度为 13 cm。为了透水留沙, 约束模型河道的有机玻璃挡板上布置透水孔, 并贴有一层不锈钢过滤网(60 目)和一层尼龙网纱(100 目)。试验装置见图 1。

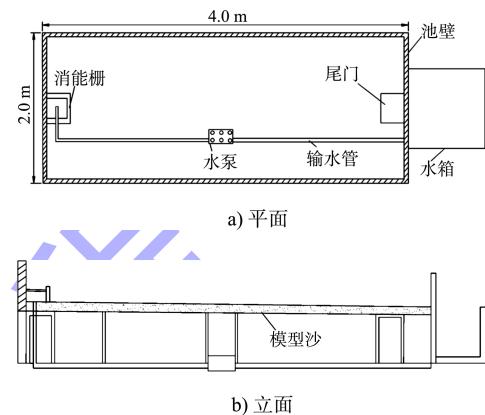


图 1 试验装置

2.2 试验过程

本试验为清水造床试验, 采用自来水, 循环过程中水流含沙量较小。放水前, 在水池正中央开挖一条顺直河道作为初始河道, 河道断面形态为宽 12 cm、深 4 cm 的矩形。将床面进行粗整平, 然后在试验平台内加水直至泥沙孔隙水饱和, 再利用水准仪将床沙整平。通过比降调节平台尾部的旋转把手, 将床尾调至所需位置, 形成均匀坡降。试验过程中通过调节流量模拟不同流量和初始河宽对河岸稳定性的影响, 并测量河道初始断面形态, 记录河道形态变化, 观察水流运动、泥沙冲淤、河道展宽、河道弯曲程度变化等, 记录河流形态达到稳定的时间, 1 组实验完成。

为方便监测河道形态的演变, 将所测河道分为 2 段, 用池壁焊缝标记, 自上游到下游的方向分别称作河段 1、2, 均长 1.75 m。用定点摄像系统对河流形态进行监测和记录, 2 个摄像头分别固定在所测河段的正上方, 用计算机程序控制定时拍照, 时间间隔为 10~200 min。各工况条件下, 分别在河段 1、2 的上中下游河道两侧岸线上取点, 每个工况每个时刻取 3 组测点, 两两测点连

线垂直于岸线切线方向, 将求得的 3 个数据的平均值作为每个工况下每个时刻的河宽。每个工况下河流形态稳定后, 分别在河段 1、2 的河岸一侧密集取点、提取坐标, 分别计算相邻两点的距离, 累加后得到岸线的实际长度 L , 再通过首尾两个点

的坐标得到河段直线长度 I , 最后得到不同工况下河道曲率 $K_a = L/I^{[13]}$ 。

试验共分 3 个组次, 参数见表 1。各工况河道演变图分别见图 2~4。

表 1 试验工况及参数

工况	初始河宽/cm	初始河深/cm	流量/(mL·s ⁻¹)	床面比降/%	试验历时/min	河宽变化/cm	展宽速率/(cm·min ⁻¹)	曲率
1	12	4	172	0.8	10	13.12	0.112 0	-
					30	13.34	0.011 0	-
					100	14.42	0.015 4	-
					200	17.69	0.032 7	-
					400	18.89	0.006 0	1.016
2	12	4	75	0.8	10	12.45	0.045 0	-
					30	12.76	0.015 5	-
					100	13.12	0.005 1	-
					200	13.57	0.004 5	-
					400	14.05	0.002 4	1.006
3	16	4	172	0.8	10	16.31	0.031 0	-
					30	16.56	0.012 5	-
					100	17.65	0.015 6	-
					200	22.08	0.044 3	-
					400	23.38	0.006 5	1.019

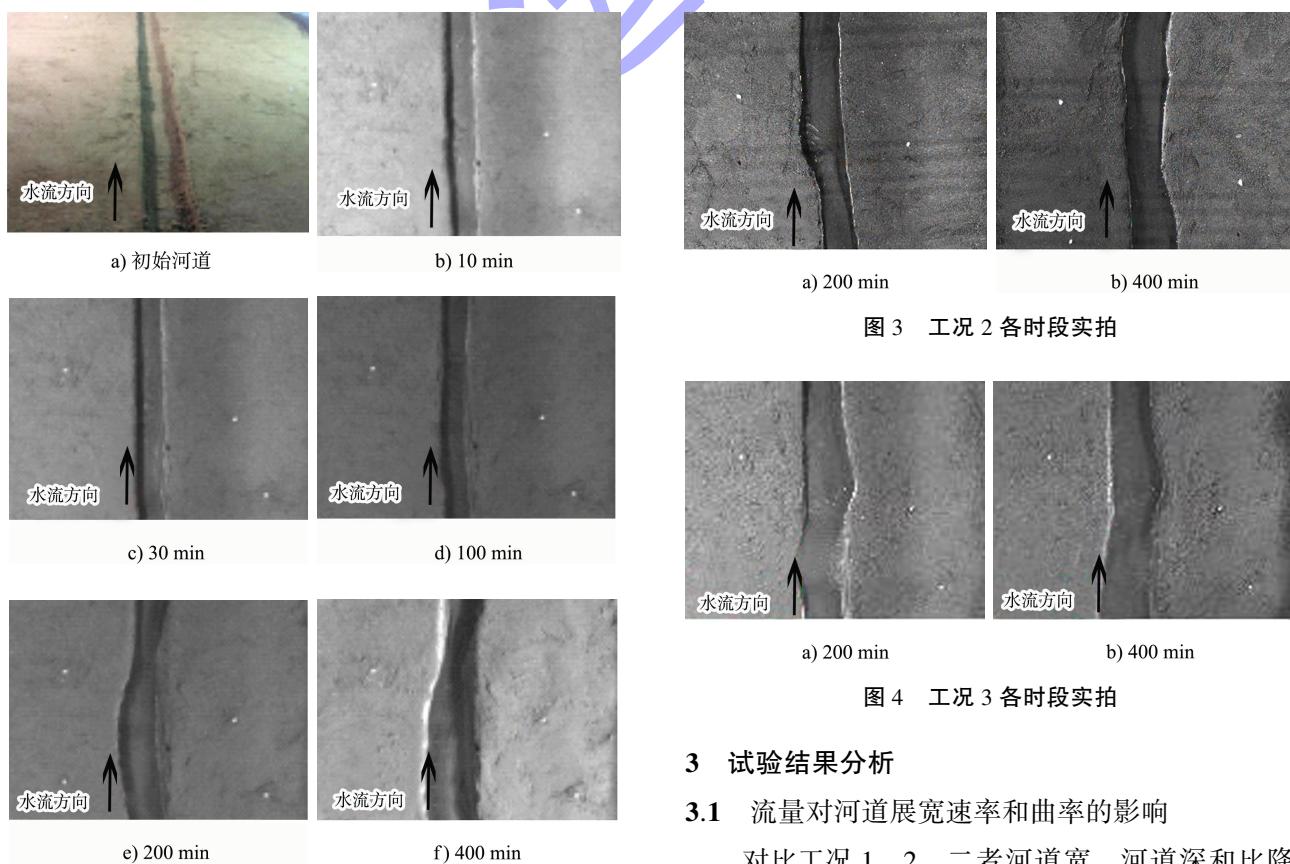


图 2 工况 1 各时段实拍

3 试验结果分析

3.1 流量对河道展宽速率和曲率的影响

对比工况 1、2, 二者河道宽、河道深和比降均相等, 工况 1 的流量较大。由试验结果可知,

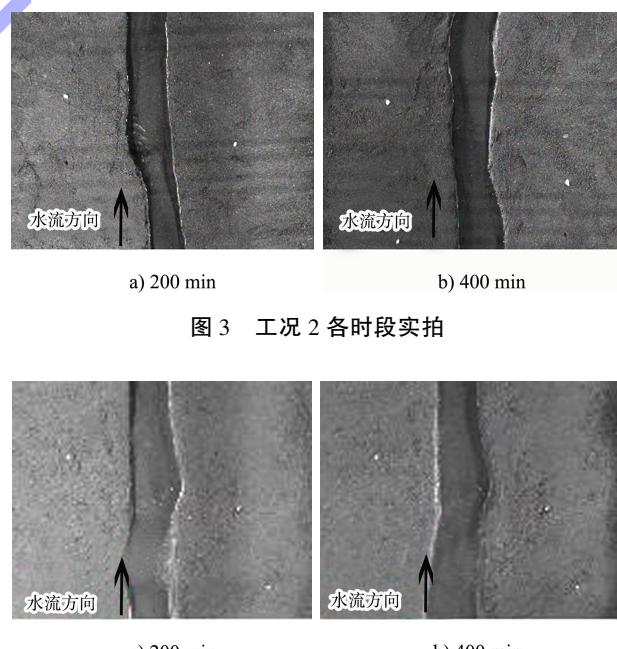


图 3 工况 2 各时段实拍

3.2 河道曲率对河道展宽速率的影响

对比工况 2、3, 二者河道宽、河道深和流量均相等, 工况 3 的比降较大。由试验结果可知,

3.3 河道展宽速率对河道曲率的影响

对比工况 1、3, 二者河道宽、河道深和流量均相等, 工况 3 的展宽速率较小。由试验结果可知,

除了在 30 min 时工况 1 的展宽速率略小, 其他时刻均为流量大的情况下河道展宽速率大, 稳定后展宽绝对值也较大。30 min 时出现的流量大、展宽速率小的情况是由于工况 1 在前 30 min 内河道迅速展宽, 水流条件减弱, 水流对河岸的顶冲作用减弱。

由上述对比可见, 其他条件相同的情况下, 流量大的工况展宽速率和弯曲程度较大, 即河道允许通过的流量越大, 河岸抵抗水流冲刷的能力越强, 横向越稳定。

3.2 初始河宽对河道展宽速率和曲率的影响

对比工况 1、3, 二者初始河深和比降相等, 工况 1 的初始河宽较小。试验数据显示, 10 min 时工况 1 展宽速率较大, 这是由于初始河宽较小时, 河岸条件对水流条件适应较差, 水流易集中, 对河岸的冲刷强度大。而其他时刻工况 3 的展宽速率和曲率均大于工况 1。可见其他条件相同时, 初始河宽越大, 河道展宽速率越大, 曲率越大, 横向越不稳定。

试验中经过冲刷的河道床面高低不平, 冲刷过程中若用钢尺测量水深会出现钢尺拦截水流造成水面不稳定的情况, 而且河段内的水面高度相差较多, 若测量多处取平均值会造成较大误差, 故在明确流量和河宽对河流横向稳定性的影响后, 则通过量纲分析法探究水深对河流横向稳定性的影响。

通过量纲分析式(17), 可以得到衡量河流横向稳定性的指标:

$$\delta_b = \frac{Q^2}{gb^2 h^3} \quad (18)$$

由此得到河床综合稳定指标:

$$\varphi = \delta_h \delta_b = \frac{d_{50}}{hJ} \cdot \frac{Q^2}{gb^2 h^3} \quad (19)$$

以上得到的河床稳定指标具有量纲和谐的特征, 可同时反映河床纵向和横向稳定性, 并适用于不同形态河流的原型和模型。

4 分类阈值曲线

本文将顺直型河流和蜿蜒型河流统一划分为单线型河流进行研究^[14], 从文献数据中^[15-22]选取

大量不同类型的天然河流及部分试验小河数据, 以砾质和砂质河流的 $\lg \delta_b$ 为横坐标、 $\lg \varphi_b$ 为纵坐标绘图并拟合得到阈值曲线, 如图 5 所示, 分别为 2 组相互平行的抛物线, 可以将砾质和砂质河流中不同类型河流区分开。

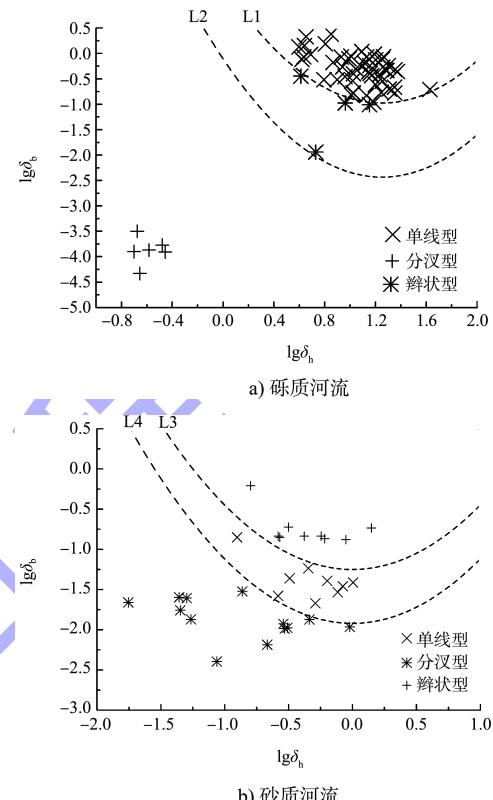


图 5 河流形态分类方法

图 5 中拟合方程分别为:

1) 砾质河流分汊阈值曲线 L1:

$$\lg \varphi_b = 1.48725 \lg^2 \varphi_h - 3.72138 \lg \varphi_h + 1.35294 \quad (20)$$

2) 砾质河流辫状阈值曲线 L2:

$$\lg \varphi_b = 1.48725 \lg^2 \varphi_h - 3.72138 \lg \varphi_h - 0.10639 \quad (21)$$

3) 砂质河流辫状阈值曲线 L3:

$$\lg \varphi_b = 0.8 \lg^2 \varphi_h - 1.25 \quad (22)$$

4) 砂质河流分汊阈值曲线 L4:

$$\lg \varphi_b = 0.8 \lg^2 \varphi_h - 1.92 \quad (23)$$

5 结论

1) 提出河流形态参数 φ , 通过对达西公式进行推导, 明晰了影响河流形态的若干因素。将河床稳定性分为纵向和横向进行研究, 通过量纲分析法结合试验法确定了河床横向稳定指标的计算方法。

2) 用阈值曲线将砾质河流与砂质河流中的单

线型河流、分汊型河流和辫状河流分类。砾质河流中的单线型河流位于曲线最上方，辫状河流位于曲线最下方，分汊型河流位于过渡区域。砂质河流中，辫状河流位于曲线最上方，分汊型河流位于曲线最下方，单线型河流位于过渡区域。

参考文献：

- [1] NANSON C G, KNIGHTON D A. Anabranching rivers: their cause, character and classification[J]. Earth surface processes and landform, 1996, 21(3) : 217-239.
- [2] EATON B C, MILLAR G R, DAVIDSON S D. Channel patterns: braided, anabranching, and single-thread [J]. Geomorphology, 2010, 120(3) : 353-364.
- [3] XIN W Y, XU H J, BAI Y C. River pattern discriminant method based on resistance parameter and activity indicators [J]. Geomorphology, 2018, 303: 210-228.
- [4] LEOPOLD L B, WOLMAN M G. River channel patterns: braided, meandering and straight [J]. Geological survey professional paper, 1957(9) : 39-85.
- [5] PARKER G. On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers [J]. Journal of fluid mechanics, 1976, 76(3) : 457-480.
- [6] CARSON M A. The meandering-braided river threshold: a reappraisal [J]. Journal of hydrology, 1984, 73 (3-4) : 315-334.
- [7] BEGIN Z B. The relationship between flow-shear stress and stream pattern[J]. Journal of hydrology, 1981, 52(3/4) : 307-319.
- [8] 华东水利学院.河流力学[M].北京:人民交通出版社, 1981: 117-118.
- [9] 张红武.黄河下游洪水模型相似律的研究[D].北京:清华大学, 1995.
- [10] 张红武,张清.黄河水流挟沙力的计算公式[J].人民黄河, 1992, 14(11) : 7-9, 61.
- [11] 谢鉴衡.江河演变与治理研究[M].武汉:武汉大学出版社, 2004.
- [12] 钱宁.冲积河流稳定性指标的商榷[J].地理学报, 1958, 24(2) : 128-144.
- [13] 邵学军,王兴奎.河流动力学概论[M].北京:清华大学出版社, 2005.
- [14] 尹学良.弯曲性河流形成原因及造床试验初步研究[J].地理学报, 1965(4) : 287-303.
- [15] HEY R D, THORNE C R. Stable channels with mobile gravel beds[J]. Journal of hydraulic engineering, 1986, 112(8) : 671-689.
- [16] JAN H, VAN D B. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers [J]. Geomorphology, 1995, 12 (4) : 259-279.
- [17] 王光谦.游荡型河流演变及模拟[M].北京:科学出版社, 2005.
- [18] 张红武.河流力学研究[M].郑州:黄河水利出版社, 1999.
- [19] 尹学良.弯曲性河流形成原因及造床试验初步研究[J].地理学报, 1965(4) : 287-303.
- [20] 周宜林.游荡性河段漫滩水流特性试验研究[D].武汉:武汉水利电力大学, 1995.
- [21] CHANG H H. River morphology and thresholds [J]. Journal of hydraulic engineering, 1985, 111(3) : 503-519.
- [22] CHANG H H. River channel changes: adjustments of equilibrium[J]. Journal of hydraulic engineering, 1986, 112(1) : 43-55.

(本文编辑 王传瑜)

3) 薛春水道航道整治工程是长江“645”工程的先期工程，工程的建成可为武安段类似水道治理提供经验。由于工程未对李家洲边滩进行全面守护，特别是李家洲边滩中下部的串沟区域及右槽中下段，在不利水文年仍存在变化的可能，且整治建筑物与河床相适应需要相对较长的时间，下阶段仍需要进一步加强观测、分析和研究。

参考文献：

- [1] 黄晶晶. 长江干线武汉至安庆段 6 米水深航道整治产

生的经济效益分析[J].中国水运, 2020 (12) : 74-76.

- [2] 沈磊. 长江中游薛春水道近期演变及浅区成因分析[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(9) : 168-169, 173.
- [3] 黄召彪,李冬.长江中游薛春水道航道整治工程工程可行性研究报告[R].武汉:长江航道规划设计研究院, 2016.
- [4] 袁达全,李冬.长江中游薛春水道航道整治工程初步设计[R].武汉:长江航道规划设计研究院, 2017.
- [5] 黄成涛,沈磊.长江中游薛春水道航道整治工程效果分析报告[R].武汉:长江勘察设计院(武汉)有限公司, 2021.

(本文编辑 王传瑜)

- [1] 黄晶晶. 长江干线武汉至安庆段 6 米水深航道整治产