

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.014

丁磊, 窦希萍, 高祥宇, 等. 长江口深水航道回淤量时间序列混沌特征分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 97-103. (DING Lei, DOU Xi-ping, GAO Xiang-yu, et al. Chaotic characteristics of back-silting quantity of Yangtze River estuary's deep-water channel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 97-103.)

长江口深水航道回淤量时间序列混沌特征分析

丁磊, 窦希萍, 高祥宇, 潘 昀, 焦增祥

(南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对长江口深水航道回淤分布情况,以回淤最严重的 $H-N$ 段为中间段 P_2 段, H 段以上为 P_1 段, N 段以下为 P_3 段,将全部航道分为3段。采用混沌理论对深水航道全段及各分段回淤量时间序列的饱和关联维数以及 K_2 熵进行混沌特征分析。各分段的饱和关联维数变化范围为 1.80~2.15, K_2 熵变化范围为 0.08~0.12;全段的分数维与 K_2 熵的值大于各分段,分别为 2.93 和 0.16。各分段的饱和关联维数研究表明,长江口深水航道回淤量的时间序列具有混沌特征,全段混沌特征的复杂性高于各分段。根据 2011 年,2012 年和 2013 年长江口深水航道回淤量的时间序列,利用混沌方法对深水航道未来回淤量进行预测,各分段可预报时间尺度最多为 1 年,全段的可预报时间尺度为半年。给出了长江口深水航道全段及各分段回淤动力系统数学表达式的一般形式,全段需要 3~6 个状态变量,3 个以上控制变量;各分段需要 2~5 个状态变量,3 个以上控制变量。回淤动力系统数学表达式的一般形式可为建立回淤量预报模式提供参考。

关键词: 深水航道;混沌特征;回淤量;时间序列

中图分类号: U61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)02-0097-07

长江口深水航道治理工程是国内规模最大水运工程之一,目前面临着较严重的航道回淤问题。航道回淤预测一直是长江口深水航道治理工程的研究核心和难点^[1],有必要通过不同方法加以研究。

长江口属粉沙淤泥质多汊河口,在径流、潮流、波浪和盐水的综合作用和影响下,泥沙运动规律极其复杂。长江口深水航道治理工程分三期实施,从二期工程 10 m 水深的维护开始,航道的维护疏浚量上升迅速。三期工程开工后,航道回淤量超过预期,回淤分布高度集中且洪枯季(5—10 月为洪季,11 月至次年 4 月为枯季)差异明显^[2]。虽然通过加长丁坝等工程措施来提高落潮流速,减淤效果显著,但回淤总量仍然较大。谈泽炜等^[3]分析了泥沙和水动力条件等各类因素变化的影响,提出相应减淤措施;刘高峰等^[4]指出近底高含沙水体进入航道并导致北槽中段回淤量大的部分原因;在对各期回淤量的预报研究中,窦希萍^[1]建立了长江口深水航道回淤量预测数学模型并对一、二、三期工程实施后回淤量进行了预报。虽然对长江口深水航道回淤的研究很多,但现阶段无论是数学模型还是物理模型在 12.5 m 航道回淤量的预测上与实际仍有较大差距。因此,随着 12.5 m 航道运行以及回淤实测数据的不断积累,采用数学分析方法进行回淤量预测是另一个重要研究途径。潘昀等^[5]采用分形理论对长江口深水航道年回淤量进行预测,给出了未来回淤量的变化范围。除分形理论外,混沌理论也是对时间序列进行分析的数学方法,通过对动力系统时间序列所反映的系统隐含特性的研究,来预测动力系统未来行为。不少学者在水文预测^[6]、洪涝灾害预测^[7]等方面利用混沌特征量中的一个或多个对不同对象的混沌特征进行研究,然而此方法尚未应用到航道回淤动力系统的研究中。

目前,混沌理论中,根据动力系统时间序列预测其未来发展趋势的预测算法有很多,如局域法、加权一阶

收稿日期: 2015-04-19

作者简介: 丁磊(1993—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事河口水动力学及物质运输研究。

E-mail: hhudinglei@126.com

局域法、基于神经网络的时间序列预测法等,但在对混沌时间序列预报前,需对混沌系统进行判别。本文尝试利用混沌理论对长江口深水航道动力系统回淤量时序进行混沌特征分析,进一步认识深水航道回淤动力系统特征,为采用合理的混沌预报算法预测未来深水航道回淤量奠定基础,为基于成因机理的长江口深水航道回淤动力模型的构建提供借鉴。

1 混沌理论

1.1 混沌特征量

混沌理论中,对于任意动力系统,通过对时间序列的构造,可以形成一个对应的相空间,随着时间发展,所有轨迹线都趋向于一个子空间,即吸引子^[8]。混沌系统的吸引子被称为奇异吸引子,其特征量是判断该系统是否具有混沌特征的主要指标,包括饱和关联维数, Kolmogorov 熵(K_2 熵)等。

混沌系统吸引子对应相空间的规律可通过饱和关联维数表现。饱和关联维数在表述奇异吸引子性质时为该吸引子中各点所需的最少独立坐标数,表示吸引子所对应的相空间维数的最小值。 K_2 熵是吸引子轨道点空间分布的平均信息量,是动力系统相空间轨道发散与收敛程度的一种度量,饱和关联维数和 K_2 熵均可判断系统是否处于混沌状态以及混沌程度, K_2 熵还可估计可预报时间^[9]。饱和关联维数与 K_2 熵基本保持一个正相关关系。饱和关联维数越大, K_2 熵越大,说明混沌运动越复杂。复杂程度高的极限是没有规律的随机运动,复杂程度低的极限是完全有规律可循的周期运动。当饱和关联维数与 K_2 熵为0时,说明系统完全确定,可以准确预测;当饱和关联维数与 K_2 熵趋向无穷时,系统完全随机,可以进行统计平均预测;饱和关联维数与 K_2 熵等于某个有限值时,系统是混沌的。通过计算一段航道回淤量时间序列相关的混沌特征量,可以判断该航道的回淤动力系统是否处于混沌状态以及混沌的复杂程度。

对初始值的强烈敏感依赖是混沌运动的最大特征。初始值的稍微改变可以导致系统发生重大变化,混沌运动的长期行为不可以准确预测。但是,混沌运动整体上又是确定的,以周期性随机现象表现出来,其短期行为可以比较准确预测^[10]。 K_2 熵的倒数可作为系统平均预报时间,为深水航道回淤量时间序列的预报提供了思路。因而对深水航道动力系统混沌特征量的分析是正确认识深水航道动力系统以及对回淤量时间序列做出较为精准预报的基础和关键。

1.2 相空间重构

对于任何时间序列的混沌识别以及进一步的混沌分析都需要建立在相空间重构的基础上。重构相空间是一个把时间序列建立一个与之对应的多维相空间,并保持原有的几何性质与动力特征。混沌系统的相空间通常具有极大的维数,其中每一个点代表混沌系统的全部可能的状态。最常用的相空间重构方法为时间延迟坐标法。研究时把动力系统概化为 n 个变量的一阶偏微分方程,可以表示为:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

表示系统时间变化的状态空间可用坐标与其 $(n-1)$ 阶导数构成的 n 维空间来表示。即

$$Y(t) = [x(t), x^{(1)}(t), \dots, x^{(n-1)}(t)]^T \quad (2)$$

实际应用时,所收集的资料一般为离散时间序列,因而系统状态空间不再连续,式(2)中连续的导数部分用时间滞留进行离散,离散结果为:

$$Y(t) = [x(t), x(t+1), \dots, x[t+(n-1)\tau]]^T \quad (3)$$

因此,若对一时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n ,选定延迟时间 τ 和嵌入维数 m 。可得与时间序列对应的相空间为:

$$Y_i = [x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}] \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (4)$$

其中 $l = n - (m - 1)\tau$ 。求 τ 的方法主要为自相关法,定义为:

$$C_l(\tau) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i+\tau) - \bar{x}][x(i) - \bar{x}]}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^2} \quad (5)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)$ 。作 $C_l(\tau)$ 与 τ 的关系曲线, $C_l(\tau)$ 下降通过 0 点时对应的 τ 即为最合适的延迟时间。

对于一时间序列, 每个嵌入维数 m 对应一个混沌吸引子的关联维数 d_m , 随着嵌入维数 m 的增大, 关联维数 d_m 会逐渐增加, 直到某一定值并不再改变, 该值为饱和关联维数, 即该混沌吸引子的维数, 其对应的嵌入维为饱和嵌入维。饱和嵌入维是描述混沌运动所需的最多变量自由度个数。饱和关联维与饱和嵌入维的数目是非线性动力学系统中应包含状态变量数目的最小值与最大值。嵌入维数的确定方法以饱和关联维法最为实用。

在 m 维相空间序列 $Y_i(i = 1, 2, \dots, l)$ 中, 设 $r_{ij}(m)$ 为任意两点之间的二范数 $\|Y_i - Y_j\|$ 。给定一个介于 $r_{ij}(m)$ 最大值与最小值之间的数 r_0 , 为了找出所有小于 r_0 点的概率, 定义一个函数 $C(r)$:

$$C(r) = \frac{\sum_{i,j=1, i \neq j}^l H(r_0 - \|Y_i - Y_j\|)}{l(l-1)} \quad (6)$$

式中: $H(x)$ 为 Heaviside 函数, x 比 0 大时值为 1, 否则值为 0。通过调整 r_0 的大小, 可以算出一系列 $\ln(r_0)$ 和 $\ln(C(r))$ 的值。则关联维数 d_m 可通过下式计算:

$$d_m = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\ln(C(r))}{\ln(r_0)} \quad (7)$$

K_2 熵可以在计算出饱和关联维数的基础上利用最小二乘法回归求得^[11]。

2 资料来源

为了解长江口深水航道动力系统特征及其内部差异, 采用 2011, 2012 和 2013 年长江口深水航道各疏浚单元的实测回淤量资料。图 1 为长江口深水航道及疏浚单元示意图, 表 1 为 2011, 2012 和 2013 年长江口深水航道月回淤量。分析表明, 长江口深水航道二期工程竣工以来, $H \sim N$ 段的回淤最为严重, 因而根据深水航道的回淤情况, 将航道分为 3 段, H 单元以上为 P_1 段, $H \sim N$ 段为 P_2 段, N 单元以下为 P_3 段, 对这 3 段分别进行混沌特征的判别。

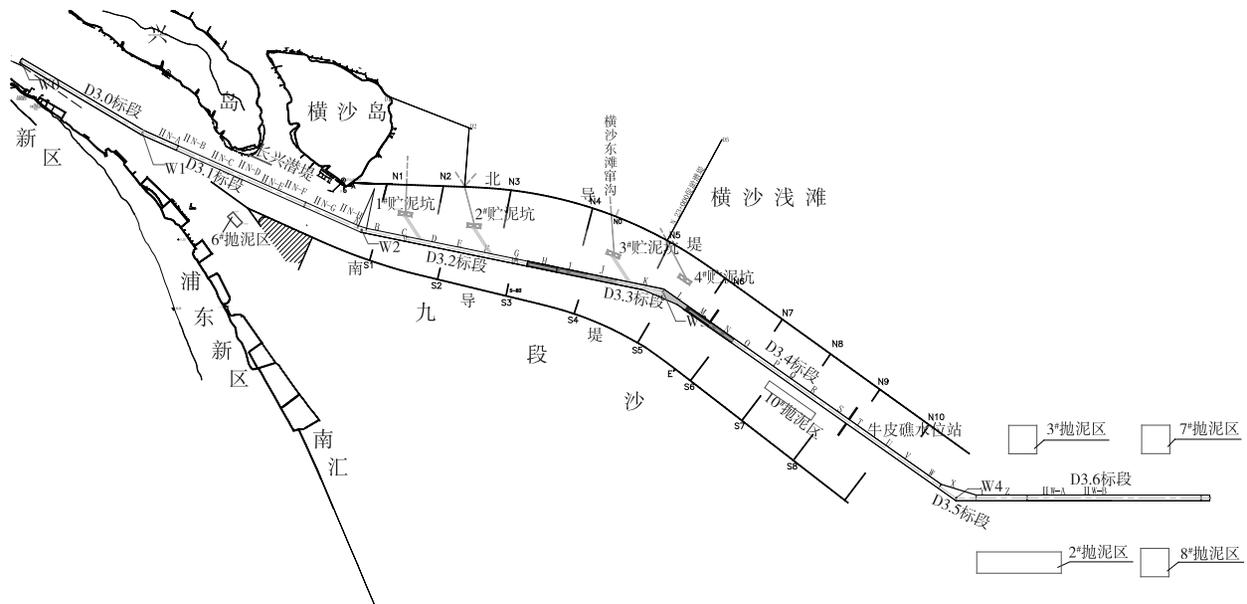


图 1 长江口深水航道示意

Fig. 1 Deep-water channel of Yangtze River estuary

表 1 2011,2012 和 2013 年长江口深水航道每月回淤量

年份	回淤量												合计
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
2011	-412.5	243.9	71.3	-170.7	-526.1	-159.9	-994.1	-1 957.6	-2 069.9	-1 120.0	-942.6	-508.1	-8 546.3
2012	247.1	-300.0	1.2	1.4	-715.3	-1 332.5	-1 512.9	-1 211.8	-1 848.0	-1 705.5	-921.3	-782.7	-10 080.3
2013	-428.9	-58.6	327.2	-532.9	-619.1	-818.9	-1 385.7	-768.3	-2 046.2	-1 177.9	-666.8	69.9	-8 106.2

3 混沌特征量分析

3.1 长江口深水航道混沌特征量计算结果

利用自相关法作出长江口深水航道全段与各分段 $C_i(\tau)$ 与 τ 的关系曲线(图 2),可确定全段与 P_1, P_2, P_3 段 $C_i(\tau) = 0$ 时, τ 分别为 2.89, 2.81, 2.83, 3.01。可取全段与各分段的延迟时间均为 $\tau = 3$ 。利用饱和关联维法,根据已确定的延迟时间,画出长江口深水航道全段与各分段在嵌入维数 m 逐渐增加情况下 $\ln(r_0)$ 和 $\ln(C(r))$ 的关系曲线(图 3)。每幅图中每个嵌入维数 m 对应的曲线中间均有近似直线段,直线段斜率为该嵌入维数 m 对应的关联维数 d_m 。随着 m 的增大,直线段的斜率也在增大并接近一个定值,该值即为饱和关联维数值。由图 2 可见,长江口深水航道全段与 P_1, P_2, P_3 段饱和关联维数分别为 2.93, 2.11, 1.80, 2.15, 全段与之对应的饱和嵌入维数 m 均为 6,各分段与之对应的饱和嵌入维数 m 均为 5。该结果也可通过长江口深水航道全段与各分段嵌入维数 m 与其对应的关联维数 d_m 的关系曲线(图 4)得到验证。同样可计算长江口深水航道全段与 P_1, P_2, P_3 段, K_2 熵分别为 0.16, 0.12, 0.08, 0.10。

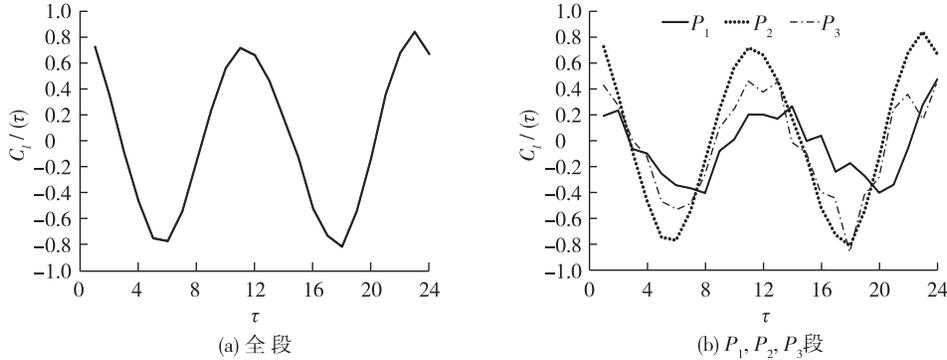


图 2 $C_i(\tau)$ 与 τ 的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of $C_i(\tau)$ and τ

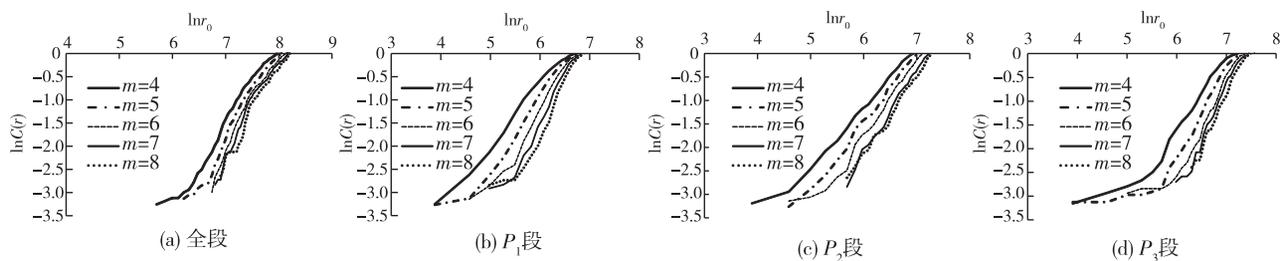


图 3 $\ln(r_0)$ 和 $\ln(C(r))$ 的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of $\ln(r_0)$ and $\ln(C(r))$

3.2 长江口深水航道混沌特征量物理意义分析

饱和关联维数和 K_2 熵是判断系统是否具有混沌特征及混沌程度的重要指标。由表 2 可见,长江口深水航道全段及各分段饱和关联维数均为正数,证明长江口深水航道回淤动力系统具有混沌特征。饱和关联维数越大, K_2 熵越大,说明混沌运动越复杂。严重回淤段 P_2 的饱和关联维数、 K_2 熵在 3 段里最小,说明混沌运动的程度相对较低,即更有规律性,但与其相邻两段 P_1, P_3 差别不大。长江口深水航道全段的饱和关联维数、 K_2 熵比各分段都要高,说明整个深水航道的动力系统复杂程度要比其中某一段的复杂程度要高。

在可预报时间内,利用混沌预报算法可较为精确地预报深水航道回淤量。依据混沌理论, K_2 熵的倒数为表征可预报时间的物理量,全段与 P_1, P_2, P_3 段的可预测时间分别为 6.67, 8.88, 12.5, 10。故长江口深水航道各分段回淤量可预测时间最多可达 1 年;而全段回淤量可预报时间仅为半年。其原因在于,长江口深水航道各段可预报时间内的回淤量与未来值均会产生一定偏差,但认为是可以接受的。而各段偏差的累积会在整个航道预测时造成不可接受的更大偏差,导致可预测时间的缩短。

3.3 长江口深水航道回淤动力系统数学表达式构建设想

长江口深水航道非线性动力学系统十分复杂,回淤量与各影响因素之间的定量数学关系确定难度很大。本文虽然是对单变量时间序列重构相空间的混沌特征进行分析,但也可为非线性动力学系统构建提供借鉴。

根据饱和关联维和饱和嵌入维的物理意义,饱和关联维表示该动力系统需要的最少独立变量数,饱和嵌入维表示该动力系统需要的最多独立变量数。对于长江口深水航道各分段,回淤动力系统应包含的最少状态变量数目为 2,最多状态变量数目为 5。若考虑整条航道,回淤动力系统应包含的最少状态变量数目为 3,最多状态变量数目为 6。这在一定程度上为构建动力学系统提供了参考。确定状态变量后,还需要若干个控制变量来全面刻画系统分叉与突变行为。控制变量的数目不小于最多与最少状态变量的差。控制变量一般是在系统演化过程中新形成的具有综合意义的变量,需要深入探讨^[12]。

由此可得长江口深水航道回淤动力系统数学表达式的一般形式:

$$dx_i/dt = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (8)$$

式中: x_i 为状态变量; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为控制变量; f_i 为非线性变换。长江口深水航道全段对应的 $n=6, i=1\sim 6$; 各分段对应的 $n=5, i=1\sim 5$ 。在未来的研究中,可从状态变量、控制变量和非线性变换的分析与确定这 3 个方面进行研究。

4 结 语

(1) 长江口深水航道的时间序列具有混沌特征。以严重淤积段($H\sim N$ 段)为中间段,将总航道段分为 3 段,全段及各分段均具有混沌特征;严重淤积段混沌特征的复杂性最低,但是与各分段没有明显区别;各分段的饱和关联维数变化范围为 1.80~2.15, K_2 熵变化范围为 0.08~0.12;全段的分数维与 K_2 熵的值大于各分段,分别为 2.93 和 0.16;说明全段混沌特征的复杂性高于各分段。

(2) 可以采用混沌预报算法对长江口深水航道回淤动力系统进行预报,长江口深水航道各分段回淤量可预报时间为 1 年,各分段的累计误差会降低全段可预报时间及预报精确性,长江口深水航道全段回淤量可

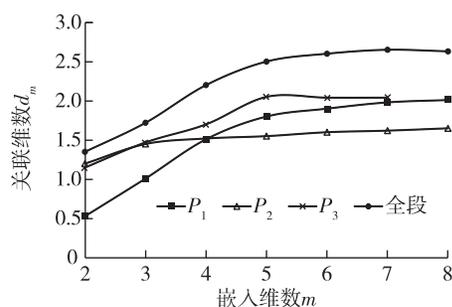


图 4 关联维数与嵌入维数关系

Fig. 4 Relationship curves of correlation dimension and embedding dimension

表 2 长江口深水航道全段及各分段混沌参数值

Tab. 2 Chaotic parameters of the whole and each section of Yangtze estuary's deep-water channel

长江口深水航道疏浚段	饱和嵌入维数	饱和关联维	K_2 熵
P_1	5	2.11	0.12
P_2	5	1.80	0.08
P_3	5	2.15	0.10
全段	6	2.93	0.16

预报时间仅为半年。

(3) 通过对于该时间序列的混沌分析,可以反演航道回淤动力系统的特征,使得基于成因机理的动力模型预测在混沌理论中找到支撑。长江口深水航道回淤动力系统非线性数学表达式需要3~6个状态变量,3个以上的控制变量;若对各分段进行研究,状态变量数改为2~5个。

参 考 文 献:

- [1] 窦希萍. 长江口深水航道回淤量预测数学模型的开发及应用[J]. 水运工程, 2006(增1): 159-164. (DOU Xi-ping. Development and application of mathematical model for prediction of back silting quantity in Yangtze estuary deepwater channel [J]. Port & Waterway Engineering, 2006(Suppl1): 159-164. (in Chinese))
- [2] 刘猛, 李为华. 长江口北槽深水航道回淤量变化宏观动力原因分析[J]. 水运工程, 2013(3): 129-139. (LIU Meng, LI Wei-hua. Analysis of macro dynamic reasons for change of back silting amount in deepwater channel project at north passage of the Yangtze estuary[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(3): 129-139. (in Chinese))
- [3] 谈泽炜, 范期锦, 郑文燕, 等. 长江口北槽航道回淤原因分析[J]. 水运工程, 2009(6): 92-102. (TAN Ze-wei, FAN Qi-jin, ZHENG Wen-yang, et al. Analysis of reasons for the siltation in north passage of Yangtze estuary[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(6): 92-102. (in Chinese))
- [4] 刘高峰, 郭文华. 长江口深水航道三期工程北槽演变特征及航道回淤部分原因分析[J]. 水运工程, 2013(11): 124-129. (LIU Gao-feng, GUO Wen-hua. Evolution characteristics of north passage and back-silting in navigation channel during the third phase improvement project of deep-water channel[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(11): 124-129. (in Chinese))
- [5] 潘昀, 窦希萍, 焦增祥, 等. 基于分形插值方法的长江口深水航道回淤量计算[J]. 海洋工程, 2015, 33(3): 66-73. (PAN Yun, DOU Xi-ping, JIAO Zeng-xiang, et al. The calculation of back silting quantity in Yangtze estuary deepwater channel based on fractal interpolation method[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(3): 66-73. (in Chinese))
- [6] 王文均, 叶敏, 陈显维. 长江径流时间序列混沌特征的定量分析[J]. 水科学进展, 1994, 5(2): 87-94. (WANG Wen-jun, YE Min, CHEN Xian-wei. Quantitative analysis of chaotic characters for the Yangtze River flow time series[J]. Advances in Water Science, 1994, 5(2): 87-94. (in Chinese))
- [7] 周寅康, 王腊春, 许有鹏, 等. 淮河流域洪涝变化动力系统研究[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 41-45. (ZHOU Yin-kang, WANG La-chun, XU You-peng, et al. An approach to the dynamics of the flood series in the Huaihe River basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(1): 41-45. (in Chinese))
- [8] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. (LV Jin-hu, LU Jun-an, CHEN Shi-hua. Chaotic time series analysis and application[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese))
- [9] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal[J]. Phys Rev A, 1983, 28(4): 2591-2593.
- [10] 洛伦兹 E N. 混沌的本质[M]. 刘式达, 刘式适, 严中伟, 译. 北京: 气象出版社, 1997. (LORENTZ E N. The essence of chaos[M]. Translated by LIU Shi-da, LIU Shi-shi, YAN Zhong-wei. Beijing: Meteorological Press, 1997. (in Chinese))
- [11] 赵贵兵, 石炎福. 从混沌时间序列同时计算关联维和Kolmogorov熵[J]. 计算物理, 1999, 16(3): 309-315. (ZHAO Gui-bing, SHI Yan-fu. Computing fractal dimension and the kolmogorov entropy from chaotic time series[J]. Chinese Journal of Computation Physics, 1999, 16(3): 309-315. (in Chinese))
- [12] 马建华, 管华. 系统科学及其在地理学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (MA Jian-hua, GUAN Hua. System science and its application in geography[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))

Chaotic characteristics of back-silting quantity of Yangtze River estuary's deep-water channel

DING Lei, DOU Xi-ping, GAO Xiang-yu, PAN Yun, JIAO Zeng-xiang

(Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of the Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: According to the distribution of the back-silting quantity of the Yangtze River estuary's deep-water channel, the whole channel is divided into three sections: the middle section P_2 is section $N \sim H$, which is under the most severe back-silting condition while the other two sections are section P_1 in the west of section H and section P_3 in the east of section N . The chaotic characteristics of the whole and each section of the deep-water channel are analyzed by calculating the saturation correlation dimension and K_2 entropy of back-silting quantity time series. The saturation correlation dimensions of sections P_1 , P_2 and P_3 are between 1.80 and 2.15 while the K_2 entropies are between 0.08 and 0.12. The saturation correlation dimension and K_2 entropy of the whole section are larger than each section, which are 2.93 and 0.16 respectively. The analysis results show that the back-silting quantity time series of the Yangtze River estuary's deep-water channel has chaotic characteristics and that the chaotic characteristic of the whole channel is more complicated than that of each section. The longest time-scale for predicting each section is one year and the time-scale for predicting the whole channel is half a year, according to the time series of the back-silting quantity of the Yangtze River estuary's deep-water channel in 2011, 2012 and 2013. A general form of the dynamic model of the whole and each section of the Yangtze River estuary's deep-water channel is given in this paper. 3 to 6-state variables and more than 3 control variables are needed in the model of the whole channel while 2 to 5-state variables and more than 3 control variables are needed in the model of each section of the channel. The general form of the dynamic model of the Yangtze River estuary's deep-water channel can provide references for the foundation of the back-silting quantity prediction model.

Key words: deep-water channel; chaotic characteristics; back-silting quantity; time series