

文章编号:1001-4179(2013)21-0007-05

平原冲积河流及潮汐河口河相关系研究进展

陆 倩^{1,2}, 龚 政^{1,2}, 李 欢², 张长宽²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:河相关系的研究旨在寻求河床形态和流域水文、动力因子间的定量关系。在介绍国内外平原冲积河流及潮汐河口河相关系研究进展的基础上,对基于水文统计的经验分析法、量纲分析法、河床最小活动性假说、水流最小能耗率极值假说以及仙农熵理论等 5 种代表性的河相关系研究方法进行了对比分析,阐述了 5 种方法的适用性。同时,进一步指出了目前研究河相关系存在的问题和困难。

关键词:河相关系; 潮汐河口; 水流最小能耗率; 河床最小活动性

中图法分类号: TV14 **文献标志码:** A

平原冲积河流或潮汐河口通过水沙、河床自动调整达到平衡状态时,其横断面形态、纵剖面形态、平面形态与流域水文、动力因子之间存在定量关系,称之为河相关系^[1]。在河道中修建水库、实施人工裁弯,以及在潮汐河口围垦或兴建挡潮闸等工程后,将改变河流及河口的进出水量和沙量,使河床发生变化。能否掌握河流及河口的自然演变规律,并正确预测河床形态的变化,是河流及河口整治工程成败的关键。

对河相关系的研究已有近百年的历史,最初从稳定渠道的断面形态开始,通过整理大量平原河流的资料,建立经验公式。20 世纪 50 年代以来,学者们把因次分析引入到河床演变研究中,大都以某种理论或假说为基础,逐步从对河相关系的纯经验分析向理论研究过渡。随着河流动力学及泥沙运动基本理论的日趋进步,学者们又试图利用河流动力学原理,寻求一个独立的河相条件与现有理论相结合,建立冲淤平衡条件下,河流、河口纵横剖面与流域水文、动力因子之间的定量关系。代表纵横剖面的变量通常为:达到平衡时的水深 H 、河宽 B 、比降 J 及水流流速 U ;代表流域水

文、动力因子的变量通常为:上游流量 Q 、上游来沙量 Q_s 及水流挟沙的代表粒径 D 。目前关于这个独立的河相条件的理论有很多,如临界起动假说,基于河床形态的原生河相关系式经验方法,最小方差理论,河底、河岸相对可动性理论,河床最小活动性假说,最小能耗率极值假说,河流自动调整的比例协调原理,河流能量耗散关系,最大输沙率假说,基于能量均衡关系的仙农熵理论等^[2-7]。本文综述了其中 5 种具有代表性的河相关系的研究方法,并进行了简要分析。

1 基于水文统计的经验分析法

国内外最早关于河相关系的探讨都是基于水文统计的经验分析法,尝试建立稳定渠道和河流的水力几何形态关系。在众多的研究成果中,具有代表性的有两个大的方面。

(1) 西方国家的学者^[8],建立了河道宽深比 $\frac{B}{H}$ 与河底及两岸沉积物中粉砂及黏土含量指标 M 的关系。

$$\frac{B}{H} = f(M), \quad \text{其中 } M = \frac{S_c B + 2S_b H}{B + 2H} \quad (1)$$

收稿日期:2013-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目“淤泥质海岸潮汐汉道口门形态演变动力机制研究”(51009062);国家自然科学基金资助项目“南黄海辐射沙脊群海域水沙通量与演变机制”(51179067)

作者简介:陆倩,女,硕士研究生,主要从事河口、海岸及滩涂地貌动力学研究。E-mail:gongzheng@hhu.edu.cn

式中, S_c 、 S_b 分别为河底及两岸沉积物中粉砂及黏土的含量; B 为河流宽度; H 为平均水深。

(2) 东方国家(包括中国)的学者, 习惯沿用根据前苏联平原河流资料得到的河相关系。

$$\frac{B^i}{H} = \varepsilon \quad (2)$$

式中, i 为指数; ε 为断面河相系数。其中 i 和 ε 的取值, 根据河床组成不同而异。对冲积性平原河流来说, 指数 i 变化不大, 一般介于 0.5 ~ 1.0 之间, 而 ε 不像式(1)中 M 有明确的定义。关于 ε 的探索性解释很多^[12], 有学者认为 ε 与 M 含义相同; 有学者认为 ε 代表河岸和河底物质起动流速之比; 有学者认为 ε 代表河岸组成物质休止角等。

其中有代表性的研究者之一俞俊认为^[13], $\varepsilon = \frac{\text{河岸边坡系数}}{\text{床沙中值粒径的平方根}} = \frac{m}{\sqrt{d_{50}}}$, 并选取河流全部悬疑质的多年平均含沙量 ρ 、悬沙中值粒径 d_{50} 、多年平均流量 Q 为参数, 在水文统计的基础上, 应用由物理成因分析和图解相结合的逐个因素消除法, 建立了一组横断面河相关系经验公式, 即

$$\begin{cases} B = 3.5Q^{0.50} \left(\frac{m}{\sqrt{d_{50}}}\right)^{0.28} \rho^{-0.13} \times d_{50}^{-0.096} \\ H = 0.26Q^{0.40} \left(\frac{m}{\sqrt{d_{50}}}\right)^{-0.18} \rho^{-0.11} \times d_{50}^{-0.076} \\ \frac{B}{H} = 13.5Q^{0.10} \left(\frac{m}{\sqrt{d_{50}}}\right)^{0.46} \rho^{-0.02} \times d_{50}^{-0.02} \\ A = 0.91Q^{0.90} \left(\frac{m}{\sqrt{d_{50}}}\right)^{0.10} \rho^{-0.24} \times d_{50}^{-0.17} \end{cases} \quad (3)$$

式中, B 、 H 、 A 分别为多年平均流量 Q 时的河槽水面宽(m)、平均水深(m)和过水断面面积(m^2)。

从式(3)中各个因素的方次大小可以看出, 影响河床水面宽和平均水深的首要因素是流量, 其次是河岸与河底组成物质的相对可冲性 ε , 流域的来沙量及颗粒特性的影响较小; 影响河床断面宽深比的主要因素是河底和河岸组成物质的相对可冲刷性, 流量的影响其次, 含沙量及其颗粒特性的影响很小。虽然基于水文统计的经验分析法建立的关系式在实际检验和测流断面变形预估中误差较小, 但是缺乏理论基础和物理意义, 研究者们开始寻求量纲分析法解决。

2 量纲分析法

量纲分析法与经验的水文统计方法在选取参量方面都具有一定程度的任意性, 但其优越性在于能够使建立的关系式符合量纲和谐的准则, 以使根据理论确定有关未知量时更加方便。Velicanov 选取了影响河床

形成的主要因素^[11], 并对前苏联许多内陆河流作了分析, 基于此, 建议取河相关系的形式为

$$\frac{B}{d} = A_1 \left(\frac{Q}{d^2 \sqrt{gD_{50}I}}\right)^{x_1}, \quad \frac{H}{d} = A_2 \left(\frac{Q}{d^2 \sqrt{gD_{50}I}}\right)^{x_2} \quad (4)$$

式中, B 为河宽; H 为平均水深; Q 为造床流量; D_{50} 为床沙的中值粒径; I 为河流平均比降; A_1 、 A_2 为待定系数; x_1 、 x_2 为待定指数。

张书农^[12]通过适当地选择影响潮汐河口河相关系的基本因素, 将式(4)推广到潮汐河流中, 得到以下关系式:

$$\frac{B}{D_{50}} = A_1(\pi)^{x_1}, \quad \frac{H_{cp}}{D_{50}} = A_2(\pi)^{x_2}, \quad \pi = \frac{Q}{D_{50}^2 U_{*o} I} \quad (5)$$

式中, Q 为涨潮的平均流量; π 为综合参数; U_{*o} 为与 D_{50} 相应的起动摩擦流速; I 为年平均高低水位线比降的绝对值的平均值; B 为平均潮位时的水面宽; H_{cp} 为平均潮位以下的断面平均水深。

通过对研究河段十几个代表年资料的点绘拟合, 得到以下关系式:

$$\begin{aligned} \frac{B}{D_{50}} &= 0.87 \times 10^{-2} (\pi)^{0.539}, \\ \frac{H_{cp}}{D_{50}} &= 0.138 \times 10^2 (\pi)^{0.262}, \quad \frac{A}{D_{50}} = 0.108 (\pi)^{0.806} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, A 为平均潮位以下的断面面积, $A = B \times H_{cp}$ 。

式(6)在概念上比前人的明确, 考虑因素更全面, 但在物理规律认识上还有待进一步研究, 可应用于特定地区, 但对于潮汐河流的普适性还有待于进一步验证。

从本质上讲, 量纲分析法仍属于经验性方法的范畴。该方法一方面便于提取最主要的因素, 另一方面则不可避免地疏漏一些因素。当给定一个错误的方程组, 同时又具有特定的量纲组合时, 因次分析则可能掩盖理论自身的谬误, 最终得到的似乎是正确的解答。于是, 人们开始基于一些理论和假说, 以探索更具有理论依据的河相关系基本方程式。

3 河床最小活动性假说

窦国仁^[13]从流域、河流及河口的整体观点出发, 从理论上探讨了冲积河流及感潮河口段的河床形态。他认为平衡河床应当能够在一定时间内排泄全部来水量和来沙量, 包括涨潮期间由海口进入的潮水量和沙量。利用水量连续方程式、输沙平衡方程式、动力方程式及河床最小活动性方程式, 导出河床水力几何形态

关系式。

平原冲积河流中悬沙是输沙的主体,因此窦国仁只讨论了以悬沙为主的河流形态。但他指出,无论考虑悬沙还是底沙,只是引用的输沙率公式不同,而且目前输沙能力公式的精度也不高,在理论论述中没有太大差别。

如果潮汐河口在 T 时间内的冲淤数量能够相互抵偿,则该时间内,上游来水量和来沙量以及由下游海口涨入的水量和沙量,必然等于同一时期内落潮期间河床断面能排泄的水量和沙量。即:

$$\begin{cases} W + W' = W'' = BH\nu T_{\text{落}} = QT_{\text{落}} \\ W_s + W'_s = W''_s = BH\nu S_* T_{\text{落}} = QST_{\text{落}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, W 、 W_s 分别为上游来水量、来沙量; W' 、 W'_s 分别为下游涨入的水量和沙量; W'' 、 W''_s 分别为 T 时期内落潮流期间流出的总水量和总沙量; B 为平均潮水位时的水面宽; H 为相应的平均水深; ν 为平均落潮流速; $T_{\text{落}}$ 为讨论时段 T 内的总落潮历时; S 为多年平均落潮含沙量; Q 为多年平均落潮流(包括上游径流的平均流量); S_* 为落潮流的平均输沙能力, $S_* = k \frac{\nu^3}{gH\nu_{os}}$; ν_{os} 为悬沙的止动流速。

联解得:

$$H = k \frac{\nu^3}{gS\nu_{os}}, \quad B = \frac{g\nu_{os}SQ}{k\nu^4}, \quad \frac{B}{H} = \frac{g^2\nu_{os}^2S^2Q}{k^2\nu^7} \quad (8)$$

窦国仁指出,在给定的来水、来沙及河床边界条件下,河床形态可能不同,原因是不同的河床具有不同的稳定性或活动性。而河床在冲淤变化过程中力求建立活动性最小的断面形态,河床的这种变化趋势,被称作河床的最小活动性原理。河床活动性的综合指标表示为

$$K_n = a \left[\left(\frac{\beta\nu}{\alpha\nu_{ob}} \right)^2 + b \frac{B}{H} \right] \quad (9)$$

式中, a 为与流量变幅相关的系数; b 为比例系数,由大量实测资料得出, $b = 0.15$; α 为河岸和河底相对稳定系数, $\alpha = \frac{\alpha_{岸}}{\alpha_{底}}$; β 为涌潮系数; ν_{ob} 为河底泥沙颗粒的止动流速。

由于力求冲积河流及潮汐河口活动性最小,因而其几何形态应符合下述条件:

$$\frac{\partial K_n}{\partial \nu} = 0, \text{ 或 } \frac{\partial K_n}{\partial H} = 0, \text{ 或 } \frac{\partial K_n}{\partial B} = 0 \quad (10)$$

可由其中任一条件得出河床活动性最小时的流速,代入式(8),即可得出稳定断面的形态方程式:

$$H = \left(\frac{7b}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{k\alpha^2\nu_{ob}^2Q}{\beta g\nu_{os}S} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad B = \left(\frac{2}{7b} \right)^{\frac{4}{9}} \left(\frac{\beta^8 g\nu_{os}SQ^5}{k\alpha^8\nu_{ob}^8} \right)^{\frac{1}{9}}$$

$$\frac{B}{H} = \left(\frac{2}{7b} \right)^{\frac{7}{9}} \left(\frac{\beta^{14} g^4 \nu_{os}^4 S^4 Q^2}{k^4 \alpha^{14} \nu_{ob}^{14}} \right)^{\frac{1}{9}}, \quad A = \left(\frac{2}{7b} \right)^{\frac{1}{9}} \left(\frac{\beta^2 k^2 Q^8}{g^2 \nu_{os}^2 S^2 \alpha^2 \nu_{ob}^2} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (11)$$

式(11)表明,在河床土壤相近的情况下,断面宽深比的大小主要取决于水量和沙量的多寡,即 B/H 与 $Q^{\frac{2}{9}} S^{\frac{4}{9}}$ 成正比,含沙量相近时,流量愈大,宽深比就愈大。公式已经在长江、黄河、永定河、汉江、赣江、淮河、新安江、富春江、伏尔加河、引黄渠系等无潮河流和渠道,以及钱塘江、射阳河、辽河、长江、曹娥江、浏河等潮汐河口的相关研究实践中得到了验证,基本适用,并可用于强涌潮河口及海湾的断面面积与水文、动力因子的关系研究中^[14]。

4 水流最小能耗率极值假说

根据最小能耗率原理,如果河流系统在某些约束条件下能够达到平衡状态,则其能耗率(包括输水能耗率和输沙能耗率两部分)应当是最小值,其中,水流最小能耗率^[15],是指当水流为恒定渐变流,佛汝德数和输沙量都不大时,河流在演变过程中,总是朝着能量损失率最小的要求来调整它的速度、水面坡降,以及与之相关的水深、河宽和糙率;当达到最小能耗率损失(最小单位水流功率)时,河流便处于相对稳定的准平衡状态。

倪晋仁^[16]应用这一假说对河相关系的物理实质进行了剖析,结果表明,在现行河相关系研究中,人们探求的第四封闭方程,实质上是关于水流冲蚀能力和河道边界抗冲能力的比值与宽深比的关系。在矩形断面中,建立改进的水流运动方程、输沙率公式(采用推移质和悬移质形式相同的公式,当 $m = 1.5$ 时,即为推移质的梅叶-彼得公式),以及水流最小能耗率假说((γQJ)_{min})的方程组:

$$\begin{cases} Q = BUH \\ Q_s = KB(\tau - \tau_c)^m, \quad \tau = \gamma RJ \\ U^2 = R^{1/3} \frac{BHJ}{2\alpha_\omega^2 H + \alpha_b^2 B}, \quad R = \frac{BH}{B + 2H} \\ \gamma RJ = \min \end{cases} \quad (12)$$

式中, R 为水力半径; τ 为水流剪切力; J 为河道比降; τ_c 为床面起剪应力; Q_s 为推移质输沙率; α_ω 、 α_b 分别为河岸和河底糙率; γ 为清水容重; K 为系数。

运用求条件极值的数学方法,求得第四封闭方程为

$$\frac{\tau}{\tau_c} = \frac{3B + 6H}{3(1 - m)B + 6(m + 1)H + K_1 m B} \quad (13)$$

当 $m = 1.5$ 时, $\frac{\tau}{\tau_c} = \frac{2 \frac{B}{H} + 4}{10 + (k_1 - 1) \frac{B}{H}}$ 。其中,

$$K_1 = \frac{3(\frac{B}{H} - 2)(2\lambda + \frac{B}{H}) + 9(\frac{B}{H} - 2\lambda)(2 + \frac{B}{H})}{(7 \frac{B}{H} + 12)(2\lambda + \frac{B}{H}) + 3 \frac{B}{H}(2 + \frac{B}{H})},$$

$$\lambda = \frac{\alpha_w^2}{\alpha_b^2}。$$

由式(13)可以看出,河相关系的第四封闭方程反映的是相对剪切力 τ/τ_c 与宽深比 B/H 的关系。 B/H 的变化范围可以很大,但 τ/τ_c 的变化是一个极限值。当 λ 增大(河岸的抗冲性相对增大)时, τ/τ_c 的增大并不能使 B/H 迅速增大;当 λ 较小时, τ/τ_c 的增大将使 B/H 相应较快地增大,这与实际情况是相吻合的。此外,不管是推移质还是悬移质河相关系,当 $\lambda = 1$ (即 $\alpha_w = \alpha_b$), $B/H = 2$ 时,总对应着 $\tau/\tau_c = 1$,这表明,通常所说的水力最佳断面与输沙特性和输沙量的多少无关。

倪晋仁对窦国仁的公式(11)作了进一步地探讨和简化,从而得出如下形式:

$$\frac{\tau}{\tau_c} = 0.912K_2 \cdot \alpha^2 \cdot \frac{B}{H} \quad (14)$$

式中, K_2 为简化系数。

可以看出,窦国仁得到的河相关系式实际上也是相对剪切力 τ/τ_c 与 B/H 的关系,二者反应的是河岸与河底物质抗冲特性的参量 $\alpha = \frac{\alpha_{岸}}{\alpha_{底}}$ 与 $\lambda = \frac{\alpha_w^2}{\alpha_b^2}$,在概念上属于同一范畴。但比较两者的关系式,在式(13)中, τ/τ_c 与 B/H 呈线性关系,在式(14)中,则呈正比例关系,前者的 τ/τ_c 存在一个极限值,后者无极限值。若将两种结果画在一张图中,差异更为直观。尽管两者有着类似的物理意义,但在定量上,其差异较为明显,差异的根源可能来自两种假说的合理性。

5 仙农熵理论

仙农熵是人们首次进行信息量化的成功尝试。近年来,仙农熵概念和理论已经成为研究水力学和河流动力学中一些具有随机特性变量问题的新工具。国外已将仙农熵应用到研究冲积河流单一断面稳定的河床形态等方面^[17-18],国内关于仙农熵在河相关系方面的研究和应用才刚刚起步。

在一定的水力条件下,河道演变的能量来自河道中水流机械能的消耗。在能量均衡关系的基础上,拾兵利用仙农熵理论^[7],对影响沙质河床稳定河相关系的因素进行了探讨。

对于一个连续物理量 x 的仙农熵 $H(X)$,用概率密度函数可表示为

$$H(X) = - \int p(x) \ln p(x) dx \quad (15)$$

式中, $p(x)$ 为概率密度; $p(x) dx$ 为该物理量在取值 x 和 $x + dx$ 之间出现的概率。

由式(15)定义的仙农熵是表征变量 x 的随机性或不确定性程度的一个状态变量。在连续型随机变量的概率密度函数满足约束条件的前提下,系统的熵最大(由于 $0 < p(x) < 1$, 有 $\ln p(x) < 0$, 因此 $H(X) > 0$)^[19]。

假定在试验段流量一定的情况下,由于试验水流不断冲刷,认为滩地宽度 B 随时间等概率变化,平均水深 H 递减。令河相关系数 $\zeta = \frac{\sqrt{B}}{H}$, 则 ζ 在试验采样的 $T_0 \sim T_i$ 时间段内呈单调递增的趋势, ζ 的概率密度函数为: $P(\zeta) = \frac{1}{T_i - T_0} (\frac{d(\zeta)}{dT})^{-1}$ 。将概率密度函数形式应满足的概率空间性质作为约束条件,采用变分法求解河相关系数概率熵 $H(\zeta)$ 的极大值,取得条件极值时, ζ 应满足:

$$\zeta = \frac{B_0^{0.5}}{kH_0} \ln [e^k + (e^{k(\frac{B_0}{H_0})^{0.5}(\frac{H_0}{H_i})} - e^k) \frac{T - T_0}{T_i - T_0}] \quad (16)$$

式中, k 为待定参数。

式(16)为河相关系数随时间的变化公式,若已知所求河段的上下游边界条件(断面宽度、平均水深、时间),则可求出任意时刻的河相关系数,从而可以预测不同时段河道宽度调整后的断面形态。作者在中国海洋大学河流工程实验室利用物理模型作了试验验证,点绘的试验数据与计算值吻合良好,即所建沙质河道模型的宽度调整遵循仙农熵原理。然而,该理论在实际河流中是否适用,还有待进一步验证。

6 结语

(1) 基于水文统计的经验分析法和量纲分析法,在试图对复杂现象进行定量描述时是必不可少的,虽然不能为研究提供明确的物理意义,但可以引导研究者建立河床形态与流域水文、动力因子间的定量关系,是较为常用的河相关系研究方法。

(2) 水流最小能耗率极值假说和河床最小活动性假说,其前提是河床系统已处于平衡状态,适用于具有中长期演变特征的平原冲积河流和潮汐河口。对研究河口整治以及河口滩涂围垦等工程实施后的短期效应,这两种理论的适用性还有待验证。

(3) 借助仙农熵理论建立的河相关系式,适用于沙质河床形态的变化过程研究,且其优势在于,建立了

任意时刻的河相关系数,不再受制于河床处于平衡态的约束。该方法在用于(粉沙)淤泥质河床形态研究的适用性上还有待探索,另外,该方法还有待经过实践的验证。

(4) 从以上研究方法中可以发现,研究者企图寻找一个能够表达边界抗冲能力的指标,如文中提及的 M 、 ε 、 d 、 α 、 λ 。如何将边界抗冲能力定量表示,是目前研究河相关系所面临的最困难的问题之一,这也是选取研究参量多样化的原因。

(5) 总体而言,目前用于河相关系研究的方法及类型较多,包括基于水文统计的经验分析法、量纲分析法,基于能量均衡关系的仙农熵理论,基于河床最小活动性假说、水流最小能耗率极值假说等方法。虽然各种研究方法在理论分析上差别很大,但在资料来源区的实际应用中并没有体现出明显的优劣。所以,在研究平原冲积河流及潮汐河口河相关系时,如果河床形态与流域水文、动力因子实测资料较丰富,应优先考虑基于水文统计的经验分析法。另外,可以采用相对具有物理意义的量纲分析法,以及基于最小能耗率极值假说和河床最小活动性假说的河相关系分析法进行研究,并应对各种方法在所研究河段的适用性方面开展研究。

参考文献:

- [1] 倪晋仁,马蔼可. 河流动力地貌学[M]. 北京:北京大学出版社,1998.
- [2] Li Ruh - Ming, D B Simons, M A Stevens. Morphology of cobble steams in small watersheds[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1976,102(8):1101 - 1117.
- [3] 熊国立. 蜿蜒型河道的河相关系[J]. 西北水资源与水工程,1995,6(2):49 - 53.

- [4] 钱文康. 基于极值假说的冲积河流河相关系研究[D]. 扬州:扬州大学,2007.
- [5] Ackers P, White R. Sediment transport - new approach and analysis [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99(11):2041 - 2060.
- [6] 黄尔,刘兴年,曹叔尤,等. 冲积河流自动调整的比例协调原理[J]. 四川大学学报,2000,32(1):4 - 6.
- [7] 拾兵,王燕,杨立鹏,等. 基于仙农熵理论的河相关系[J]. 中国海洋大学学报,2010,40(1):95 - 98.
- [8] S A Schumm. The shape of alluvial channels in relation to sediment type[J]. Geological Survey Professional Paper, 1960, 352(B):17 - 30.
- [9] 倪晋仁,张仁. 河相关系研究的各种方法及其间的关系[J]. 地理学报,1992,47(4):368 - 375.
- [10] 俞俊. 平原河流河相公式的探求和应用[J]. 人民长江,1982,(3):61 - 67.
- [11] 钱宁,张仁,周志德. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [12] 张书农,丁章宝,褚君达. 潮汐河流河相关系及浅滩冲淤规律[J]. 华东水利学院学报,1963,(S2):1 - 12.
- [13] 窦国仁. 平原冲积河流及潮汐河口的河床形态[J]. 水利学报,1964,(4):1 - 13.
- [14] 韩曾萃,曹颖,尤爱菊. 强涌潮河口河相关系及其验证[J]. 水利水电工程学报,2009,(12):83 - 90.
- [15] 黄克中,钟恩清. 最小水流能量损失率理论在河相关系中的应用[J]. 地理学报,1991,46(2):178 - 185.
- [16] 倪晋仁,张仁. 河相关系的物理实质[J]. 水文,1991,(5):1 - 6.
- [17] Shuyou Cao, Donald W. Knight. Entropy - based design approach of threshold alluvial channels [J]. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 1997, 35(4):505 - 524.
- [18] Chiu Chao - lin. Application of entropy concept in open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1991, 17(5):615 - 628.
- [19] 李宪东. 基于最大熵原理的确定概率分布的方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.

(编辑:赵秋云)

Research advance on relationship between plain alluvial river and tidal estuary

LU Qian^{1,2}, GONG Zheng^{1,2}, LI Huan², ZHANG Changkuan²

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The goal of fluvial facies relation research is to build a quantitative relationship between riverbed morphology and basin hydrology, hydrodynamic factors. We summarize the recent research advances on fluvial facies relation of plain alluvial rivers and tidal estuaries. Further, we conduct comparative study on five fluvial facies relation research methods, including empirical method based on hydrological statistics, dimensional analysis method, hypothesis of minimum activity of riverbed, hypothesis of extreme value of the minimum energy dissipation rate, and Shannon entropy theory. The problems and difficulties of present fluvial facies relation are analyzed and the applicability of these five methods is evaluated.

Key words: fluvial facies relation; tidal estuary; minimum energy dissipation rate of flow; minimum activity of riverbed