

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.04.017

稳定河道计算方法分析与比选

戴文鸿^{1,2,3}, 闫志方², 陈奕², 张松⁴, 沈余龙⁵

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098, 4. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225007, 5. 江苏泰州市姜堰区住建局, 江苏 泰州 225500)

摘要: 选取三种经典的稳定河道计算方法: Yalin 和 da Silva 方法、Chang 方法、Huang 和 Nanson 方法, 运用 323 组原型观测和水槽试验资料对不同方法进行了验证, 并对其计算误差进行了定量分析比较。结果表明: 对于稳定河宽和稳定水深的计算, 精度最高的是 Yalin 和 da Silva 方法, 最低的是 Chang 方法; 对于稳定比降的计算, 精度最高的是 Huang 和 Nanson 方法, Yalin 和 da Silva 方法稍显逊色。综合而言, Yalin 和 da Silva 方法精度较高。

关键词: 稳定河道; 形态预测; 计算方法验证; 误差分析; 比选

中图分类号: TV 147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 04 0686-05

Analysis and comparison of determination methods for stable channel

DAI Wen hong^{1,2,3}, YAN Zhi fang², CEHN Yi², ZHANG Song⁴, SHEN Yu long⁵

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Yangzhou Exploration Design and Research Institute Company Limited, Yangzhou 225007, China; 5. Jiangyan District Housing and Construction Bureau of Taizhou, Taizhou 225500, China)

Abstract: Three typical determination methods of stable channel, including Yalin and da Silva method, Chang method, and Huang and Nanson method, were selected and verified using 323 data sets from prototype measurements and flume tests. The calculation errors of these methods were analyzed and compared quantitatively. The results showed that Yalin and da Silva method has the highest precision whereas Chang method has the lowest in the calculation of channel with stable width and depth, and Huang and Nanson method has the highest precision whereas Yalin and da Silva method has lower precision in the calculation of channel with stable slope. In general, Yalin and da Silva method shows a better precision and can be recommended for use in this study.

Key words: stable channel; geometry determination; method validation; error analysis; comparison and selection

预测一定水沙条件下河道的稳定水力几何形态, 对河道防洪及整治、航运码头建设、枢纽设计等均有重要意义。关于河道稳定水力几何形态的计算方法主要有理论方法和经验方法两大类。其中理论方法是通过引入一个独立条件求解阻力方程、输沙方程, 得出稳定河宽(B_R)、稳定水深(h_R)和稳定河床比降(S_R)。为寻求这个独立条件, 国内外学者进行了长期的研究: Yalin 和 da Silva^[1]、Jia^[2]提出了最小弗劳德数假设; Chang^[3]、Millar 和 Quick^[4]提出了最小河流功假

设; Huang 和 Nanson^[5]、刘晓芳和黄河清等^[6]提出了最大水流效率假设; 窦国仁^[7]、Langbein^[8]提出了最小活动性假设; Yang 和 Song 等^[9]提出了最小能耗率假设。此外, 国内一些学者主要针对稳定河道的河相关关系式进行了理论推导^[10-11]或根据不同河流的观测数据, 推求出了针对特定河段的稳定水力几何形态与流量的经验关系式^[12-15]。目前, 对不同的理论方法计算结果的优劣, 还未有学者做出统一量化比较。本文将取最小弗劳德数、最小河流能量以及最大水流效率假设

收稿日期: 2014-10-11 修回日期: 2015-06-15 网络出版时间: 2015-05-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150530.1947.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51239003; 51479071); 江苏省自然科学基金面上项目“变化环境条件下河弯特性及河流演变的响应机理”(BK2012808); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(YS11001); 高等学校学科创新引智计划资助(B12032); 河海大学大学生创新训练计划项目(2013102941094)

作者简介: 戴文鸿(1966-), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士, 主要从事河流动力学及河流演变等方面研究。E-mail: wdai@hhu.edu.cn

中应用较多且便于实际操作的方法(Yalin 和 da Silva 方法、Chang 方法、Huang 和 Nanson 方法),运用 323 组原型观测和模型试验资料对河道稳定形态计算结果进行验证和误差对比,旨在选出一种精度较高的方法,为今后工程技术人员选取稳定河道计算方法提供参考。

1 稳定河道计算方法

1.1 Yalin 和 da Silva 方法

Yalin 和 da Silva^[1]指出:当河道中一个与能量相关的特征量达到最小值时河道将趋向稳定状态,并将弗劳德数 Fr 作为这个特征量。通过 $Fr = c^2 S^{-1} \min(c$ 为无量纲谢才系数)来判定河道的稳定,并联合阻力方程、 B_R 方程求解稳定河道参数 B_R 、 h_R 、 S_R 。

$$B_R = a_B \sqrt{\frac{Q}{V_{*cr}}} \quad (B_R \text{ 方程}) \quad (1)$$

$$V_R = \frac{Q}{B_R h_R} = c_R \sqrt{g h_R S_R} \quad (\text{阻力方程}) \quad (2)$$

$$(Fr)_R = c_R^2 S_R^{-1} \min \quad (Fr \text{ 趋于最小值}) \quad (3)$$

式中: B_R 为稳定河宽(m); h_R 为稳定水深(m); S_R 为稳定河床比降, V_R 为稳定河道断面平均流速(m/s); Q 为造床流量(m^3/s); V_{*cr} 为临界摩阻流速(m/s); c_R 为稳定河道阻力系数, d_{50} 为床沙中值粒径(mm); g 为重力加速度(m/s^2); $(Fr)_R$ 为稳定河道弗劳德数, a_B 、 Q 与泥沙中值粒径 d_{50} 有关,可根据野外及室内实验测得的数据率定。

1.2 Chang 方法

张海燕^[3]指出,冲积河流达到稳定的充要条件是在满足给定的约束条件下,单位河长的水流功率 $\rho g Q S$ 达到最小。由于流量 Q 是已知参数,水流密度 ρ 和重力加速度 g 为常数,所以 $\rho g Q S$ 达到最小意味着河道比降 S 达到最小。将该假设和阻力方程、输沙方程结合即可确定稳定河道的 B_R 、 h_R 、 S_R 。输沙方程采用 DuBoys 推移质输沙方程,阻力方程采用 Lacey 方程,建立封闭方程组如下:

$$V_R = \frac{Q}{h_R B_R} = \frac{1.346}{N_a} h_R^{3/4} S_R^{1/2} \quad (\text{阻力方程}) \quad (4)$$

$$Q_s = q_b B_R = C_d \tau_0 (\tau_0 - \tau_{0c}) B_R \quad (\text{输沙方程}) \quad (5)$$

$$S_R \rightarrow \min \quad (S \text{ 趋于最小值}) \quad (6)$$

式中: Q_s 为推移质输沙率(kg/s); q_b 为单宽输沙率($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$); C_d 为泥沙推移的特性系数,经验系数; τ_0 为床面切应力(N/m^2), $\tau_{0c} = \gamma S h$; τ_{0c} 为泥沙临界起动切应力(N/m^2), $\tau_{0c} = 0.061 + 0.093 d$; $N_a = 0.0225 (1.6 d^{1/2})^{1/4}$, 经验系数; d 为床沙粒径(mm)。

1.3 Huang 和 Nanson 方法

Huang 和 Nanson^[5]认为天然河流自适应调整达到稳定状态时水流效率最大,最大水流效率定义为单位可用河功的最大输沙能力,即 $Q_s \rightarrow \max$ 。将该理论与 Lacey 阻力方程、DuBoys 输沙方程联合,引入河道宽深比 ζ 为变量,通过数理分析方法,得到 B_R 、 h_R 、 S_R 的表达式如下:

$$\frac{20 + 3\zeta_m \zeta_m^{5/7} (\frac{4\zeta_m - 10}{30 - \zeta_m})^{9/7}}{30 - \zeta_m} = \left(\frac{Q_s^9}{\rho^2 C_d^9 C_c^{16} N_a^4 Q^4} \right)^{1/7} \quad (7)$$

$$B_R = (\rho C_d \tau_c N_a^2 \frac{Q^2}{Q_s})^{2/7} (\frac{4\zeta_m - 10}{30 - \zeta_m} \frac{1}{\zeta_m})^{2/7} \zeta_m \quad (8)$$

$$h_R = (\rho C_d \tau_c N_a^2 \frac{Q^2}{Q_s})^{2/7} (\frac{4\zeta_m - 10}{30 - \zeta_m} \frac{1}{\zeta_m})^{2/7} \quad (9)$$

$$S_R = \left[\frac{Q_s^{11}}{(\rho C_d \tau_c)^{11} N_a^8 Q^8} \right]^{1/7} \left[\frac{30 - \zeta_m}{4\zeta_m - 10} \right]^{11/7} \frac{\zeta_m + 2}{\zeta_m^{10/7}} \quad (10)$$

通过式(7)求出 ζ_m , 将 ζ_m 代入式(8) - 式(10)即可求出 B_R 、 h_R 、 S_R 。

式中: ζ_m 为 $Q_s \rightarrow \max$ 时河道宽深比。

2 计算方法验证与比较

2.1 数据来源

本文验证计算采用的数据为大量学者发表文献及工程报告^[16,28]中记录的在天然河道和试验水槽中所观测到的河宽、水深、比降(见表1),其值经长期观测几乎不发生变化或发生很小变化,说明已达到稳定,其中流量为平滩流量。

表1 数据来源及变化范围

Tab. 1 Sources and variation ranges of parameters

数据来源	平滩流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	床沙中值粒径/mm	稳定河宽/m	稳定水深/m	稳定河床比降(%)	数据组数
原型观测	0.091~ 42468.88	0.13~ 175.8	1.63~ 1381.4	0.05~ 20.12	0.0032~ 3.8	282
水槽试验	0.004~ 6.07	0.16~ 1.46	0.35~ 10	0.02~ 0.73	0.07~ 0.728	41
总计	0.004~ 42468.88	0.13~ 175.8	0.35~ 1381.4	0.02~ 20.12	0.003~ 3.8	323

2.2 计算方法验证

分别采用上述三种方法计算河道在其对应流量和床沙中值粒径下的稳定水力几何形态,以观测值为横坐标,计算值为纵坐标,对计算结果进行验证,结果见图1-图3。

由图1可看出,对河宽验证,Yalin 和 da Silva 方法的验证点集中且均匀分布在“观测=计算”直线两侧,而 Chang、Huang 和 Nanson 方法验证点较为集中,多数分布于“观测=计算”直线下侧,表明计算值偏小;由图2可看出,对水深验证,Yalin 和 da Silva 方法的验证点较均匀的分布在“观测=计算”直线两侧,而 Chang、Huang 和 Nanson 方法验证点较分散,且多数分布于“观测=计算”直线上侧,表明计算值偏大;由图3可看出,对河道比降验证,三种方法的验证点都比

较分散,表明三种方法所得河道比降均不理想。

2.3 误差计算及结果分析

Baosheng WU 等^[29]曾在比较推移质输沙公式时采用了差异比(DR)、相对误差(RE)、几何平均偏差(GAD)三个指标,本文采用这三项指标来分析比较计算值与观测值之间的误差。

$$DR_i = \frac{C_{ci}}{C_{mi}} \quad (11)$$

$$RE_i = \left| \frac{C_{ci} - C_{mi}}{C_{mi}} \right| \times 100\% \quad (12)$$

$$GAD = \left(\prod_{i=1}^N \overline{R}_i \right)^{1/N}, \quad \overline{R}_i = \begin{cases} C_{ci}/C_{mi}, & C_{ci} \geq C_{mi} \\ C_{mi}/C_{ci}, & C_{mi} \geq C_{ci} \end{cases} \quad (13)$$

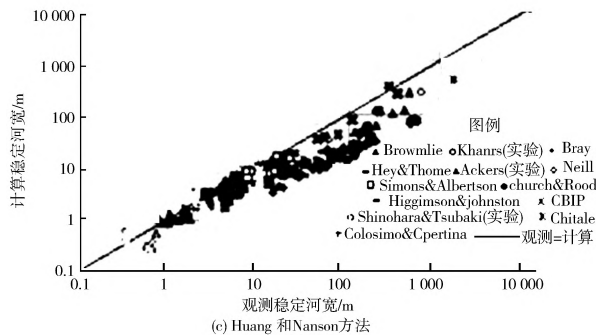
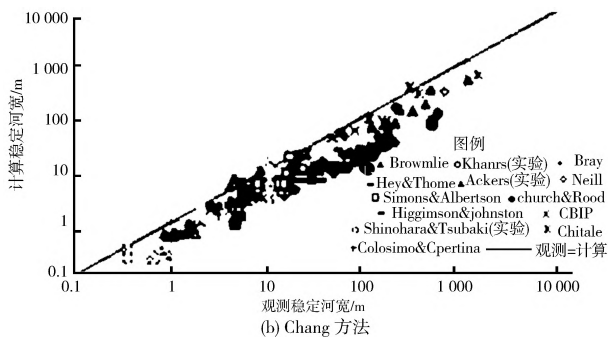
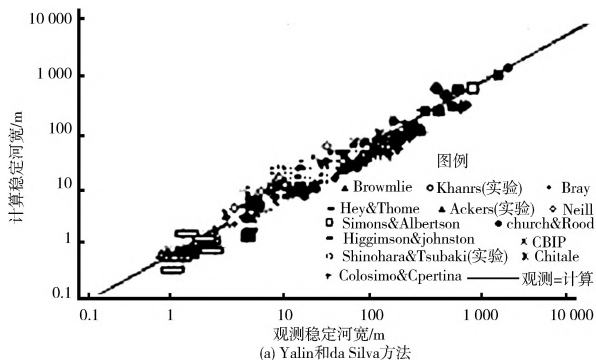


图 1 稳定河宽计算验证

Fig. 1 Calculation verification of the channel with stable width

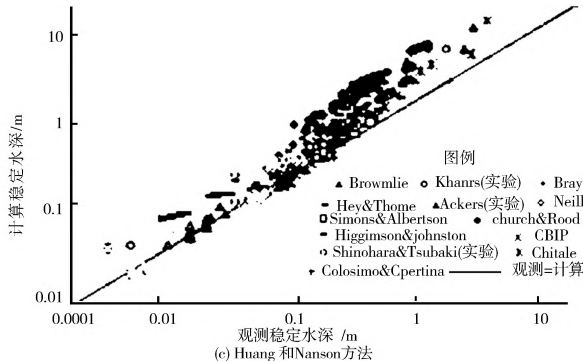
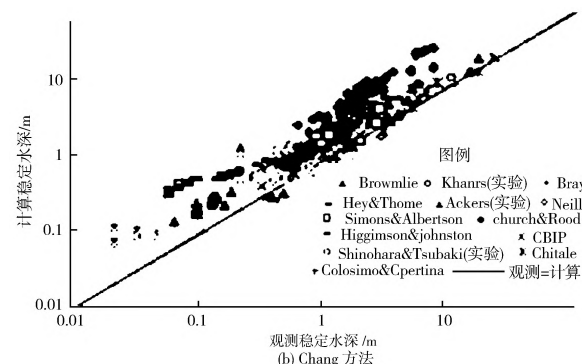
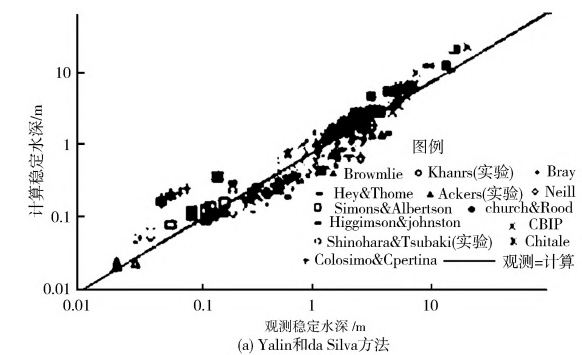


图 2 稳定水深计算验证

Fig. 2 Calculation verification of the channel with stable depth

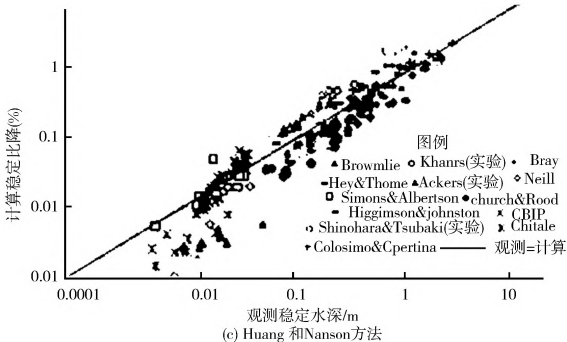
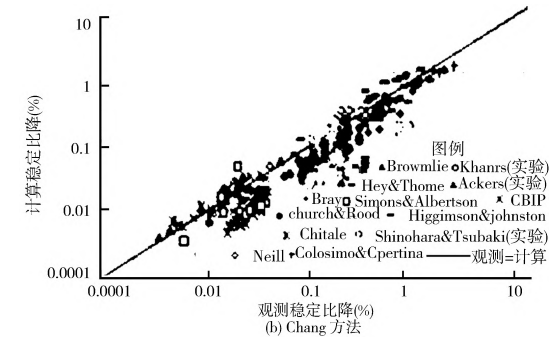
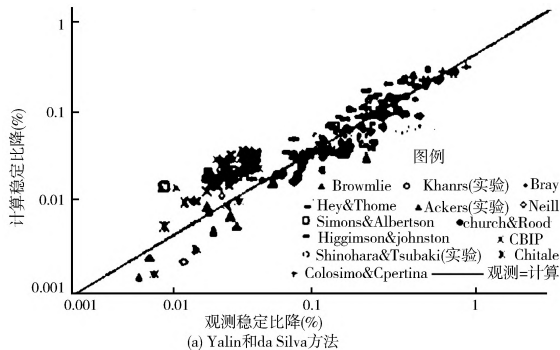


图 3 稳定河床比降计算验证

Fig. 3 Calculation verification of the channel with stable slope

式中: C_c 为计算值; C_m 为观测值; N 为数据组数; DR 越接近 1 表示计算值与观测值越接近; RE 越接近 0 表示计算值与观测值越接近; GAD 越接近 1 表示计算值与观测值越接近。三种方法误差比较见图 4。

从验证点集和误差分析结果可以看出: 对于稳定河宽和稳定水深, Yalin 和 da Silva 方法所得到的计算值与观测值较为接近, 平均相对误差分别为 29.3%、34.8%, 平均差异比分别为 0.99、1.09, 几何平均偏差均为 1.35, 可见该方法具有较高的精度, 而 Chang、Huang 和 Nanson 方法的计算结果各

误差指标均劣于前者,其中 Chang 方法精度最低;对于稳定比降,三种方法验证点集均不同程度分散,相对而言,Chang、Huang 和 Nanson 方法所得结果较好,平均相对误差分别为 43.5%、39.3%,平均差异比分别为 0.75、0.88,几何平均偏差分别为 1.85、1.61,而 Yalin 和 da Silva 方法所得结果稍显逊色。

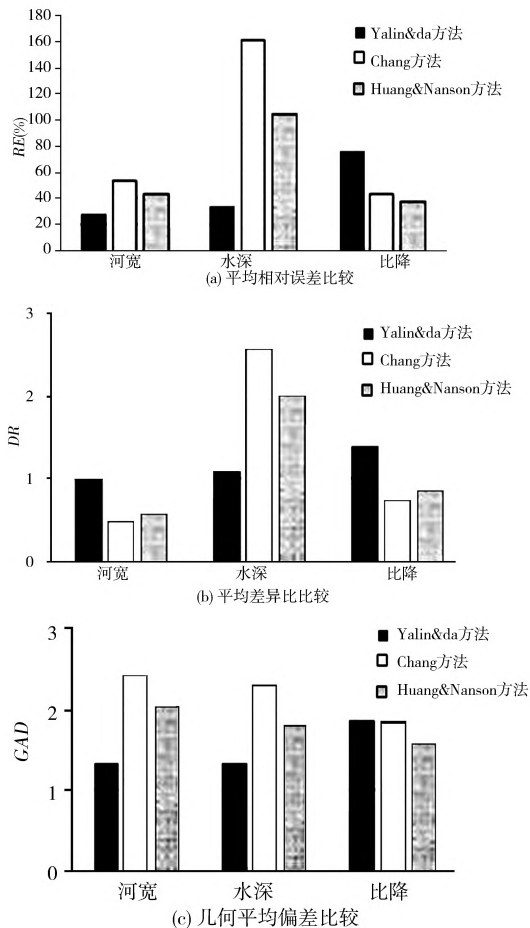


图 4 三种方法的误差比较

Fig. 4 Error comparison of the three methods

经分析,产生以上结果的原因如下。

(1) Yalin 和 da Silva 方法中未使用输沙方程,取而代之的是稳定河宽 BR 方程,该方程是在量纲分析理论的基础上采用大量实测和实验数据进行参数率定得出的,在河宽的计算中准确度较高。Chang 方法、Huang 和 Nanson 方法求解过程中引入输沙率这一变量,该参量在实际测量时就有一定难度,观测精度难以保证;另外,这两种方法均采用 DuBoys 推移质输沙方程,众所周知,推移质输沙公式有多种,而不同公式的适用范围也大不相同,精度上难以保证。所以 Yalin 和 da Silva 方法在稳定河宽和稳定水深的计算中有较高精度。

(2) 确定天然河道比降有一定困难,文献所提供的比降数据大都为河段的平均比降,观测结果具有一定误差。因此利用上述三种方法得到的比降计算值与观测值存在较大差异难以避免。

(3) 观测河道并未完全达到平衡状态。Yalin 和 da Silva^[1]指出河道调整过程中河宽较快达到稳定,而河床比降和水深则要经过长时间缓慢调整,最终达到各自稳定值。这也是三

种方法得到的比降计算值与观测值存在较大差异的原因。

由上述比较和分析结果看出,Yalin 和 da Silva 方法对稳定河道河宽和水深的计算精度最高。在实际工程设计中^[30],我们往往更关注断面的河宽和水深。基于此,在稳定河道计算中 Yalin 和 da Silva 方法可作为最佳选择。

3 结论

求解稳定河道所采用的控制方程和假设不同,所得结果也存在一定差异。对稳定河宽和稳定水深的预测,Yalin 和 da Silva 方法具有较高精度,平均相对误差分别为 29.3%、34.8%,平均差异比分别为 0.99、1.09,几何平均偏差均为 1.35,而 Chang、Huang 和 Nanson 方法计算结果各误差指标均劣于前者,其中 Chang 方法精度最低,河宽和水深平均相对误差分别为 53.4%、161.0%,平均差异比分别为 0.49、2.57,几何平均偏差分别为 2.42、2.31;对于稳定比降的计算,Chang、Huang 和 Nanson 方法所得结果较好,平均相对误差分别为 43.5%、39.3%,平均差异比分别为 0.75、0.88,几何平均偏差分别为 1.85、1.61,而 Yalin 和 da Silva 方法所得结果稍显逊色。但由于对于特定断面来说,河宽和水深是更关注的参数,因此 Yalin 和 da Silva 方法可作为稳定河道计算的最佳选择。

参考文献(References):

- [1] Yalin, M S da Silva, A M F. Fluvial Processes [M]. IAHR Morphograph, IAHR, Delft, The Netherlands, 2001.
- [2] Jia Y. Minimum Froude number and the equilibrium of alluvial sand rivers[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15: 199-209.
- [3] Chang H H. Fluvial processes in river engineering [M]. John Wiley & Sons, Toronto, 1988.
- [4] Millar RG, Quick MC. Stable width and depth of gravel bed rivers with cohesive banks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(10): 1005-1013.
- [5] 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 Landforms, 2000, 25: 1-16.
- [6] 刘晓芳,黄河清,邓彩云,等.冲积河流稳定平衡条件与断面几何形态的数理分析[J].泥沙研究,2012(1):14-22. (LIU Xiaofang, HUANG Heqing, DENG Caiyun. Mathematical physical analysis of stable equilibrium condition and channel form in alluvial rivers[J]. Journal of Sediment Research, 2012(1): 14-22. (in Chinese))
- [7] 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(2):1-13. (DOU Guoren. Evolvement of plain alluvial river and tidal estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964(2): 1-13. (in Chinese))
- [8] Langbein WB. Geometry of river channels[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1964, 90: 301-312.
- [9] Yang CT, Song CCS and Woldenberg M J. Hydraulic geometry and minimum rate of energy dissipation[J]. Water Resources Research. 1981, 17: 1014-1018.
- [10] 陈绪坚,胡春宏.河流最小可用能耗率原理和统计熵理论研究[J].泥沙研究,2004(6):10-15. (CHEN Xujian, HU Chur

- hong, . Research on the theory of minimum rate of available energy dissipation and statistic entropy in rivers[J]. Journal of Sediment Research, 2012(6): 10-15. (in Chinese)
- [11] 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: 自然科学版, 2010, 40(1): 95-98. (SHI Bing, WANG Yan, YANG Lipeng, et al. Hydraulic Geometry Based on Shannons Entropy Principle[J]. Periodical of Ocean University of China: Nature Science, 2010, 40(1): 95-98. (in Chinese))
- [12] 尹国康, 陈宝冲. 从河相关系探讨长江冲积河床的自动调整[J]. 泥沙研究, 1983(3): 33-41. (YI Guokang, CHEN Baochong. A Preliminary Study on the self adjustment of the alluvial channel of the Yangtze river from the viewpoint of hydraulic geometry[J]. Journal of Sediment Research, 1983(3): 33-41. (in Chinese))
- [13] 齐璞, 王昌高. 黄河艾山以下河道水力几何形态与冲淤特性[J]. 人民黄河, 1992(12): 12-15. (QI Pu, WANG Changgao. Hydraulic geometry and characteristics of scouring and deposition of the Yellow River course downstream Aishan [J]. Yellow River, 1992(12): 12-15. (in Chinese))
- [14] 黎明, 李茂江, 陈国建, 等. 下荆江河道水力几何形态的研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2000, 25(6): 708-712. (LI Ming, LI Maojiang, CHEN Jianguo. Study on the hydraulic geometry of low Jingjiang river stream channels [J]. Journal of Southwest China University : Natural Science, 2000, 25(6): 708-712. (in Chinese))
- [15] 马元旭, 许炯心. 无定河及其各支流的断面水力几何形态[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 345-353. (MA Yuanxun, XU Jiongxin. The hydraulic geometry of Wuding River and its tributaries [J]. Geographical Research, 2009, 28(2): 345-353. (in Chinese))
- [16] Bray D. Estimating average velocity in gravel bed rivers[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1979, 105(9): 1103-1122.
- [17] Brownlie W R. Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels[J]. PhD dissertation, California Inst. of Technol., Pasadena. Calif. 1981.
- [18] Center Board of Irrigation and Power[R]. Library of Canal Data, Technical Report No. 15. 1976.
- [19] Chitale S V. River channel patterns[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1970, 96(1): 201-221.
- [20] Church M, Rood R. Catalogue of alluvial river channel regime data[R]. Rep., Dept. of Geography, Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada. 1983.
- [21] Colosimo C, Coppertino V A, Veltri M. Friction factor evaluation in gravel bed rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 861-876.
- [22] Hey R D, Thome C R. Stable channels with mobile gravel beds [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1986, 112(8): 671-689.
- [23] Higgins N J, Johnston H T. Estimation of friction factors in natural streams. River regime[M]. John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y., 251-266. 1988.
- [24] Simons D B, Albertson M L. Uniform water conveyance channels in alluvial material [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1960, 86 (HY 5): 33-71.
- [25] Neill C R. Hydraulic geometry of sand rivers in Alberta [R]. Hydrology Symp., Alberta (preprint). 1973.
- [26] Kellerhals R, Neill C R, Bray D I. Hydraulic and geomorphic characteristics of rivers in Alberta [R]. Alberta Cooperative Research Program in Highway and Engineering. 1972.
- [27] Shinohara K, Tsubaki T. On the characteristics of sand waves formed upon the beds of the open channels and rivers [R]. Reprinted from Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan. 1959.
- [28] Ackers P. Experiments on small streams in alluvium [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1964, 90(5): 1-37.
- [29] Baosheng WU, D S van MAREN, Lingyun LI. Predictability of sediment transport in the Yellow River using selected transport formulas [J]. International Journal of Sediment Research. 2008, 23(4): 283-298.
- [30] 赵忠文. 河道枢纽设计和模型试验研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 114-116, 120. (ZHAO Weizhong. Pivot design of river course and its experimental research of models [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 114-116, 120. (in Chinese))

(上接第 685 页)

- [9] 钟华平, 刘恒, 耿雷华. 河道内生态需水估算方法及其评述 [J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 430-434. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua. Review of assessment methods for in-stream ecological flow requirements [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3): 430-434. (in Chinese))
- [10] 门宝辉, 刘昌明. Tennant 法计算标准的修正及其应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 479-482. (MEN Baohui, LIU Changming. Modified calculative criterion of tennant and its application [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 479-482. (in Chinese))