

长江口悬沙有效沉速时空变化规律

杨云平, 李义天, 王冬, 韩剑桥

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 通过长江口肖山一口外实测资料研究悬沙有效沉速的变化规律, 结果表明: 整个水域悬沙垂向分布近似符合指数型分布, 采用 Rouse 公式计算悬沙有效沉速变化, 洪季和枯季悬沙沉速自肖山—南、北港河段为减小趋势, 且涨潮悬沙有效沉速小于落潮; 无论洪季或枯季, 大潮与小潮的涨潮悬沙沉速均接近, 落潮悬沙沉速则大潮大于小潮; 平面分布上, 北槽悬沙有效沉速大于南槽, 两者均存在 1 个悬沙沉速较大区域, 恰为滞流点和滞沙点活动区域, 即最大浑浊带发育区域; 计算得到肖山一口外洪季悬沙有效沉速变化范围为 1.60 ~ 7.94 mm/s, 枯季悬沙有效沉速变化范围为 2.40 ~ 6.38 mm/s.

关键词: 悬沙有效沉速; Rouse 公式; 时空变化; 长江口

中图分类号: TV148+.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)05-0024-06

长江口为径流和潮流相互作用的典型中等潮汐河口, 大通站入海年平均含沙量为 0.384 kg/m^3 (1950-2010 年), 文献[1]表明, 入海泥沙约有 10% 沉积在大通站至徐六泾之间, 徐六泾至南支口门略有冲刷, 31% 淤积在口门外的水下三角洲, 40% 淤积在杭州湾及近海, 4% 用于造陆和岸线, 北支淤积约占 6.5%. 河口悬沙大量沉降是塑造河口地貌形态的基本动力. 长期以来国内学者对长江口不同区域的悬沙沉降速度进行研究, 如时钟等^[2-7]运用 Rouse 公式拟合法分析了长江口南、北槽悬沙沉速. 悬沙有效沉速基于单一测点, 季节和潮型单一能否代表整个河段有待于验证. 文献[8]研究区域较前人有所扩展, 但限于洪季大潮悬沙沉速数值在长江口应用受到限制. 此外也有运用声学悬沙观测法^[9]、现场试验分析法^[10]进行河口悬沙有效沉速的研究, 其中 Rouse 公式拟合法以其简单和适用性广泛用于河口悬沙有效沉速研究.

本文采用 Rouse 公式拟合法对长江口江阴至口外整个水域洪、枯季和大、小潮悬沙沉速进行研究, 研究悬沙有效沉速的沿程分布规律, 并就悬沙时空变化进行比较分析, 得出悬沙有效沉速分布模式, 完整地揭示了长江口悬沙有效沉速时空分布规律.

1 长江口河段水沙特性

本文计算长江口悬沙沉速区域为江阴至口外水域, 其中江阴站至石化下采用 2004 年洪季和 2005 年枯季资料, 南北港及南、北槽洪季计算采用 2005 年资料, 枯季采用 2007 年资料. 由于测量时间和测量难度限制, 河口区上段为断面测量, 北槽及南槽测点均位于深槽, 断面测量难度较大, 仅收集了部分散点数据. 测点布置及名称见图 1 所示. 长江口悬沙和床沙中值粒径见表 1, 悬沙中值粒径北支口最大, 可达 0.016 mm , 江阴至口门悬沙中值粒径

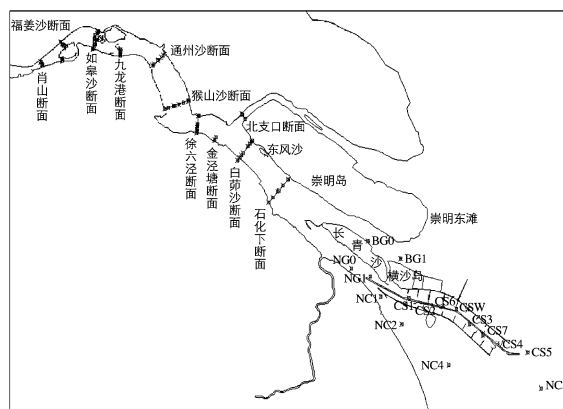


图 1 长江口测点布置

Fig. 1 Layout of measuring points at the Yangtze River estuary

收稿日期: 2012-02-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(重大水利工程影响下河口水沙和地貌变化过程(2010CB429002))

作者简介: 杨云平(1985-), 男, 黑龙江绥化人, 博士研究生, 主要从事长江河口演变机理方面研究.

E-mail: yangsan520_521@163.com

在 0.01 mm 左右. 床沙中值粒径自肖山至口门呈减小趋势,南、北槽悬沙中值粒径约 0.01 mm,这与悬沙中值粒径相近,因而南北槽河段悬沙和床沙交换频繁,也是长江口最大浑浊带发育地带. 长江口大、小潮平均悬沙浓度洪季和枯季均沿程增加,且洪季大于枯季,肖山至徐六泾河段洪季平均含沙量约为枯季的 2.8 倍.

表 1 长江口各河段泥沙特征

Tab. 1 Sediment characteristics of the Yangtze River estuary

测 站	悬沙粒径/mm	床沙粒径/mm	洪季含沙量/(kg·m ⁻³)	枯季含沙量/(kg·m ⁻³)
肖 山	0.010	0.139	0.127	0.047
福姜沙	0.009	0.270	0.119	0.039
如皋沙	0.009	0.097	0.121	0.054
九龙港	0.011	0.123	0.164	0.052
通州沙	0.014	0.154	0.118	0.037
狼山沙	0.009	0.068	0.140	0.056
徐六泾	0.012	0.057	0.178	0.069
白茆沙	0.011	0.048	0.188	0.124
石化下	0.009	0.077	0.178	0.131
南北港	0.009	0.048	0.504	0.360
南 槽	0.010	0.010	0.570	0.596
北 槽	0.009	0.011	0.696	0.647
北支口	0.016	0.078	1.032	0.174

2 悬沙沉速公式推导及验证

2.1 悬沙有效沉速公式推导

恒定均匀挟沙水流中的悬沙垂向分布,可用 Rouse 公式表示:

$$\frac{S}{S_a} = \left[\frac{\frac{h}{z} - 1}{\frac{h}{a} - 1} \right]^{Z^*} \quad (1)$$

式中: Z^* 为悬浮指标, $Z^* = w_s / (ku_*)$, u_* 为底床的摩阻流速; S_a 为参考悬沙浓度(g/L); a 为参考距离, h 为水深(m); k 为 Karman 常数.

假定悬沙沉降速度沿水深恒定,此时,可对 Rouse 公式等号两侧取自然对数,得到:

$$\ln S = \ln S_a + Z^* \ln \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right) \quad (2)$$

利用最小二乘法求解公式(2)得:

$$Z^* = \frac{\sum_l^n \left[\ln \left(\frac{h-z_i}{z_i} \right) - \bar{B} \right] [\ln S_i - \bar{A}]}{\sum_l^n \left[\ln \left(\frac{h-z_i}{z_i} \right) - \bar{B} \right]^2} \quad (3)$$

式中: n 为垂向测点总数目; S_i 为垂向第*i*测点悬沙浓度(g/L); z_i 为垂向第*i*测点水深(m); $\bar{A} = \left(\sum_l^n \ln \left(\frac{h-z_i}{z_i} \right) \right) / n$, $\bar{B} = \left(\sum_l^n \ln S_i \right) / n$. 假定潮汐作用下水深平均流速与潮流水力比降近似符合均匀流规律,则长江口地区摩阻流速同水深平均流速之间存在如下关系^[11]: $\bar{u} / u_* = 19.95H^{1/6}$, H 为包含潮位在内的总水深(m).

2.2 悬沙垂向结构检验

Rouse 公式应用的假定条件为二维恒定流在平衡输沙条件下的悬沙垂向浓度呈指数分布. 图 2 为江阴

站至口门的垂向悬沙分布,近似符合指数分布规律,这与 Rouse 公式适用性的假定条件相符.

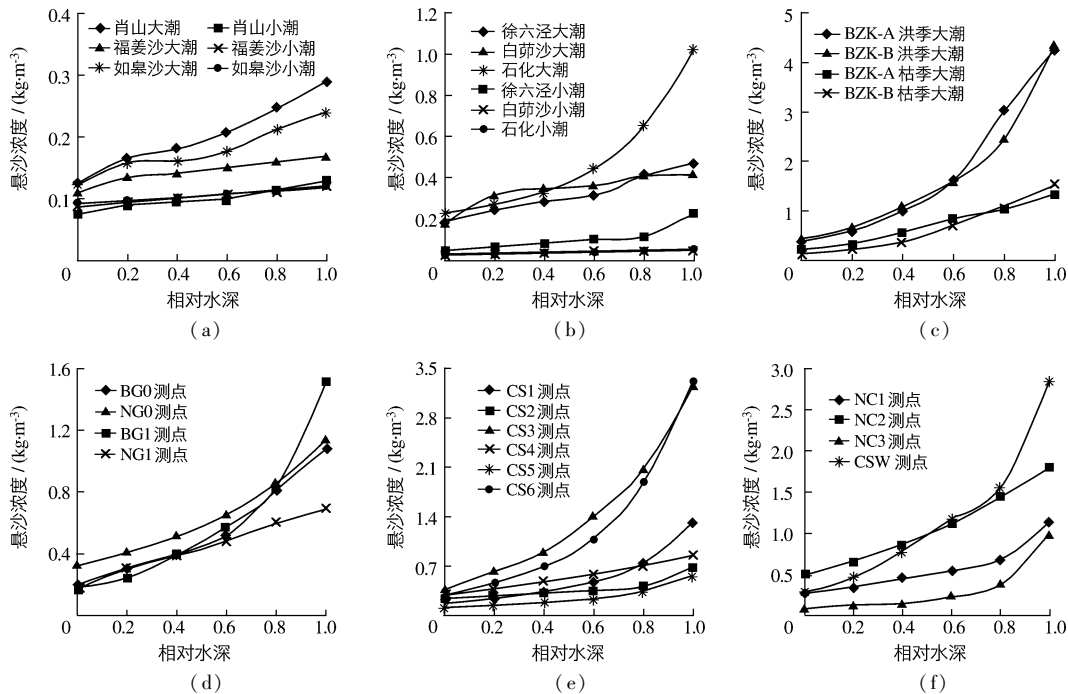


图2 长江口江阴至口外垂向悬沙分布

Fig.2 Vertical distribution of suspended sediment in Jiangyin-estuary of the Yangtze River

3 长江口悬沙沉速变化

本文计算的悬沙有效沉速,肖山至石化下断面为断面平均值,南、北港和南、北槽均为散点测量数据,计算沿程分布时为该河段数据的算术平均值.

3.1 江阴至口门悬沙有效沉速分布规律

图3为江阴至口门典型断面或河段洪季和枯季悬沙有效沉速变化,江阴至南、北港河段,洪季悬沙有效沉速沿程呈现减小趋势,枯季表现为先增加后减小,洪季悬沙有效沉速变化范围为1.60~7.94 mm/s,枯季悬沙有效沉速变化范围为2.40~6.38 mm/s.洪季和枯季全潮悬沙沉速表现为:在

九龙港断面以上悬沙有效沉速洪季大于枯季,在九龙港至南、北港河段,两者交替变化,洪季和枯季差异不大.依据潮流界位置判定可知,洪季潮流界均值位置在九龙港附近,而枯季潮流界位置均在肖山以上,使得肖山至九龙港之间洪季和枯季的水动力明显不同,洪季为径流控制,枯季为径流和潮流共同控制.由于洪季和枯季水动力不同,洪季悬沙沉速大于枯季,可见,潮流的存在使得悬沙不易落淤,悬沙有效沉速较小.南、北槽河段表现为洪季悬沙有效沉速大于枯季,北槽悬沙有效沉速大于南槽.

3.2 长江口悬沙沉速时空变化

洪季和枯季涨、落潮悬沙有效沉速变化见图4(横坐标的字母为测站或测点的名称简称,如xs代表肖山).由图可见,无论洪季还是枯季落潮悬沙有效沉速总是大于涨潮,大潮和小潮落潮悬沙有效速度相差不大,洪季落潮悬沙有效沉速在4.1~6.1 mm/s之间,枯季落潮在3.7~5.8 mm/s之间.涨潮悬沙有效沉速洪季自江阴至南、北港河段沿程先减小,其后维持在2.0 mm/s左右,枯季为沿程先增加后减小,最大值出现在

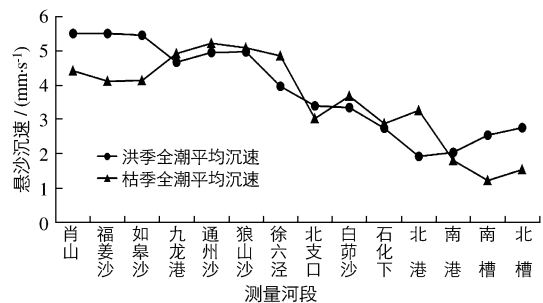


图3 长江口悬沙有效沉速时空变化

Fig.3 Space-time variation in effective settling velocities of suspended sediment of the Yangtze River estuary

通州沙至徐六泾之间. 洪季和枯季大潮时的涨潮悬沙有效沉速大于小潮, 洪季涨潮悬沙有效沉速在 1.44 ~ 6.12 mm/s, 枯季涨潮悬沙有效沉速在 1.01 ~ 4.43 mm/s.

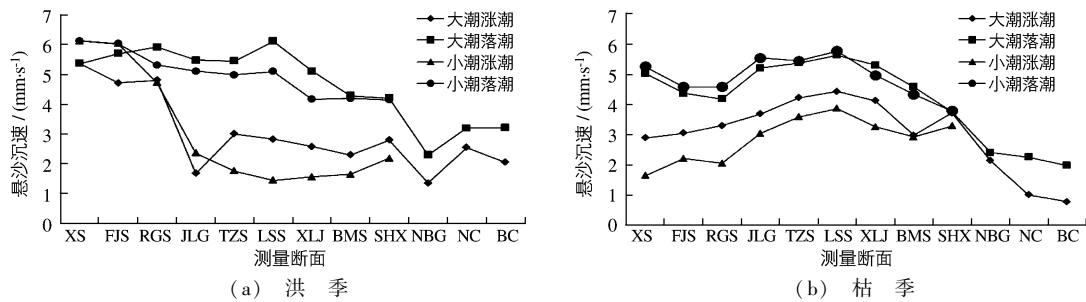


图 4 长江口悬沙有效沉速

Fig. 4 Effective settling velocity of suspended sediment in flood and dry season of the Yangtze River estuary

3.3 徐六泾至口外悬沙沉速分析

利用各测点悬沙有效沉速数值, 插值得到徐六泾至口外海滨悬沙有效沉速分布情况(图 5).

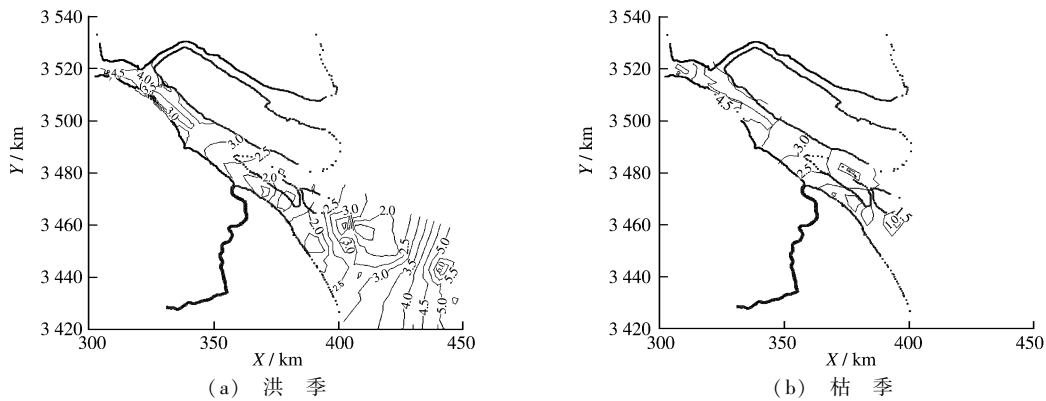


图 5 徐六泾至口外悬沙有效沉速变化

Fig. 5 Effective settling velocity of suspended sediment in flood and dry seasons of the Xuliujing-to-estuary reach

由图 5 可见, 悬沙沉速最小值出现在南、北港河段, 下泄径流经南支水道进入南、北港河段, 由于水面逐渐展宽, 水流流速逐渐减小, 水流携带泥沙能力大幅减弱, 使得南北港的悬沙有效沉速减小. 依据图 5(a) 可知, 在南槽和北槽均存在 1 个较大的核心区域, 该区域中心位置为 CS5 和 NC3 测点, 依据优势流理论计算滞流点和滞沙点平均位置可知, 北槽滞流点和滞沙点位置距横沙水文站以东 58 ~ 62 km, 南槽滞流点和滞沙点位置距九段东水文站上游约 15 km. 整理该河段盐度和悬沙中值粒径数值, 发现该区域中值粒径范围发生絮凝的最佳盐度数值与水体盐度接近, 致使南、北槽河段滞流点和滞沙点位置活动区域出现悬沙有效沉速数值最大. 枯季悬沙有效沉速最大值也是出现在滞流点和滞沙点位置活动区域(图 5(b)). 南、北槽最大悬沙沉速区域并不是不变的, 随着径流和潮流水动力强弱对比, 悬沙有效沉速最大值的核心区域将随滞流点和滞沙点活动区域变化而上下迁移.

计算得到洪季和枯季大、小潮平均的悬沙有效沉速分布规律, 其洪季悬沙沉速与文献[3]和[8]整理的长江口前人研究成果比较, 均在其范围之内, 可见本文结论可靠.

4 结 语

(1) 肖山至口外悬沙中值粒径沿程变化不大, 均在 0.01 mm 左右, 床沙中值粒径沿程减小, 南、北槽悬沙

和床沙粒径基本相同,表明南、北槽悬沙和床沙交换频繁。

(2)整个水域的悬沙有效沉速为 $0.2 \sim 8.0 \text{ mm/s}$,无论洪季还是枯季,自肖山至南、北港各河段悬沙有效沉速逐渐减小,表明径流作用越强,悬沙沉速越大,潮流的存在使得悬沙不易落淤。

(3)对比洪季和枯季的悬沙有效沉速可知,落潮悬沙沉速大于涨潮,并且洪季涨潮悬沙沉速沿程先减小,其后维持在 2.0 mm/s 左右,枯季沿程先增加后减小,且落潮悬沙有效沉速沿程变化不大。

(4)南、北槽河段比较而言,北槽悬沙有效沉速大于南槽;且均存在1个悬沙沉速最大的区域,该核心位置与南、北槽滞流点和滞沙点位置活动区域相一致,即最大浑浊带发育区域悬沙沉速最大。

参 考 文 献:

- [1] 吴华林,沈焕庭,严以新,等. 长江口入海泥沙通量初步研究[J]. 泥沙研究, 2006(12): 75-81. (WU Hua-lin, SHEN Huan-ting, YAN Yi-xin, et al. Preliminary study on sediment flux into the sea from Changjiang estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2006(12): 75-81. (in Chinese))
- [2] 时钟. 长江口北槽细颗粒悬沙絮凝体的沉速的近似估计[J]. 海洋通报, 2004, 23(5): 51-58. (SHI zhong. Approximate estimations of settling velocities of fine suspended mud flocs at the north passage of the Changjiang estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(5): 51-58. (in Chinese))
- [3] 时钟,朱文蔚,周洪强. 长江口北槽口外细颗粒悬沙沉降速[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(1): 18-23. (SHI Zhong, ZHU Wen-wei, ZHOU Hong-qiang. Settling velocity of fine suspended sediment in the Changjiang estuary[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(1): 18-23. (in Chinese))
- [4] 李九发,时伟荣,沈焕庭. 长江口最大浑浊带的泥沙特性和输移规律[J]. 地理研究, 1994, 13(3): 51-59. (LI Jiu-fa, SHI Wei-rong, SHEN Haun-ting. Sediment properties and transportation in the turbidity maximum in Changjiang estuary[J]. Geographical Research, 1994, 13(3): 51-59. (in Chinese))
- [5] 周华君,任汝述. 长江口粘性细颗粒泥沙沉降规律[J]. 重庆交通学院院报, 1994, 13(3): 10-16. (ZHOU Hua-jun, REN Ru-shu. Setting behavior of cohesive sediment in Changjiang estuary[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1994, 13(3): 10-16. (in Chinese))
- [6] 陈沈良,谷国传,张国安. 长江口南汇近岸水域悬沙沉降速度估算[J]. 泥沙研究, 2003(6): 45-51. (CHEN Shen-liang, GU Guo-chuan, ZHANG Guo-an. Settling velocity of suspended sediment in the Nanhui nearshore waters of Changjiang estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2003(6): 45-51. (in Chinese))
- [7] 汪亚平,高建华,潘少明. 长江河口区边界层参数的观测与分析[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(7): 16-20. (WANG Ya-ping, GAO Jian-hua, PAN Shao-ming. Measurement of bottom boundary layer parameters of the Yangtze River estuary[J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(7): 16-20. (in Chinese))
- [8] 张飞,王义刚,黄惠明,等. 长江口主要水道洪季悬沙有效沉速分布研究[J]. 泥沙研究, 2011(2): 60-64. (ZHANG fei, WANG Yi-gang, HUANG Hui-ming, et al. Distribution of suspended sediment settling velocity of main outlets in Changjiang estuary during flood seasons[J]. Journal of Sediment Research, 2011(2): 60-64. (in Chinese))
- [9] 时钟,周洪强. 长江口深水航道北槽口外悬沙浓度垂向分析[J]. 上海交通大学报, 1997, 31(11): 30-36. (SHI Zhong, ZHONG Hong-qiang. Vertical analysis of suspended sediment concentration in the north passage of Changjiang estuary deep waterway[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1997, 31(11): 30-36. (in Chinese))
- [10] 时钟. 河口粘性泥沙再悬浮和再夹运的声散射观测[C]//第八届全国海洋工程学术讨论会暨1997海峡两岸港口及海岸开发研讨会论文集,北京:海洋出版社,1997:67-74. (SHI Zhong. Acoustic scattering observations of estuarine cohesive sediment resuspension and re-clip shipped [C]//The 8th National Symposium of Ocean Engineering (Strait Port and Coastal Development Symposium of 1997), Beijing: Ocean Press, 1997: 67-74. (in Chinese))
- [11] 匡翠萍. 长江口拦门沙冲淤及悬沙沉降规律研究和水流盐度泥沙数学模型[D]. 南京:南京水利科学研究院,1993. (KUANG Cui-ping. Yangtze estuary sand erosion and deposition of suspended sediment settlement law studies and water salinity sediment mathematical model[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1993. (in Chinese))

Space-time variation in effective settling velocity of suspended sediment in Yangtze River estuary

YANG Yun-ping, LI Yi-tian, WANG Dong, HAN Jian-qiao

(State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The research on the variation law of the effective settling velocity of suspended sediment suggests that the vertical distribution of the suspended sediment in the whole water area approximately matches exponential distribution. Using Rouse formula to compute the variation in the effective settling velocity of suspended sediment, the research results show that: (1) the effective settling velocity of suspended sediment has a tendency of reduction in both flood and dry seasons from Xiaoshan to south and north port reach, and the rising tide one is smaller than the falling tide one; (2) in both spring tide and neap tide of the rising tide, the effective setting velocity of suspended sediment is close whether in flood or dry season but the spring one is greater than the neap one; (3) the area of the biggest effective setting velocity of suspended sediment is existing in the south and north passages. The calculated results suggest that the variation range of the effective setting velocity of suspended sediment is 1.60 ~ 7.94 mm/s in flood season and 2.40 ~ 6.38 mm/s in dry season in Xiaoshan-Yangtze estuary.

Key words: effective setting velocity of suspended sediment; Rouse formula; space-time variation; Yangtze River estuary

水利部科技推广计划项目“流域水资源和洪水管理 决策支持系统(MDSF)的推广”通过验收

2012年7月26日,水利部国际合作与科技司在南京主持召开了水利部科技推广计划项目—《流域水资源和洪水管理决策支持系统(MDSF)的推广》(任务书编号: TG1006)验收会. 验收专家组由南京大学、河海大学、淮委、海委、江苏省水利厅、南京市防汛办等单位的专家组成. 水利部国科司、水利部推广中心等单位的领导以及我院科研处领导和项目组的同志参加了会议.

验收专家组认真听取了项目负责人的工作汇报和成果介绍,详细审阅了相关资料,经质询和讨论,验收专家一致认为:项目组利用MDSF建立了“淮河中游复杂防洪工程体系下的洪水预报调度系统”提高了淮河中游实时洪水预报精度;建立了“漳卫南河流域洪水资源利用管理系统”对多种设计洪水组合进行洪水资源利用调度计算比较,提出了洪水资源利用的调度方式,为海河流域洪水资源利用提供了技术支撑.《流域水资源和洪水管理决策支持系统(MDSF)的推广》对防洪调度决策及洪水资源安全利用、缓解水资源供需矛盾提供了有效的技术支撑. 社会、经济、环境效益显著,进一步推广应用前景广阔. 项目组按任务书要求完成了规定的任务,达到了任务书要求的考核指标,以综合评价A通过验收.

摘自南京水利科学研究院网站