

基于 TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程

杨传国^{1,2}, 余钟波^{1,3}, 林朝晖², 郝振纯¹, 王振龙⁴, 李 敏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. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029; 3. Department of Geoscience, University of Nevada, Las Vegas, Las Vegas 89154, USA; 4. 安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 利用热带降雨观测计划 (TRMM) 卫星雷达降雨数据驱动分布式陆面水文模型, 研究流域尺度陆面水文过程, 评估该数据在水文模拟与预报等研究领域的性能。通过与实测雨量资料比较, 验证 TRMM 卫星雷达降雨数据的质量。分别将 TRMM 卫星雷达降雨与观测降雨作为耦合模型的气象输入, 模拟和研究淮河流域 1998 ~ 2003 年的陆面水文过程时空变化。结果表明, TRMM 卫星雷达降雨数据能够很好地描述降雨的时空分布, 利用 TRMM 降雨模拟的结果与利用观测降雨模拟的结果精度相当; 模拟流量与实测资料基本吻合。卫星雷达降雨数据在陆面水文过程研究中具有广泛的应用前景。

关键词: 热带降雨观测计划; 卫星雷达降雨数据; 水文过程; 水文模型; 时空尺度

中图分类号: P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)04-0461-06

水文模型是研究水循环过程、认识各个水文环节相互作用的重要工具, 在流域洪水模拟预报、环境变化的水文响应等领域发挥了不可替代的作用。自 20 世纪 80 年代以来, 具有物理基础的分布式水文模型逐步发展起来^[1-3], 对模型参数初始化和气象驱动数据提出了更高的时空精度要求。目前地理信息系统 (GIS)、全球定位系统 (GPS) 和遥感 (RS) 技术在水文气象等领域得到了广泛应用, 为分布式陆面水文模型提供了高精度的植被、土壤、高程等下垫面参数数据。诸多研究表明降雨是造成陆面水文模型非确定性的最主要因素^[4-5]。对于一个大规模流域或区域, 传统的站点观测降雨很难同时满足时间和空间分辨率要求, 并且在进行数据时空解集过程中不可避免地带入其它不确定性因素 (如地形) 的影响, 一定程度上制约了分布式模型在流域水文模拟与预报方面的应用^[6-8]。随着雷达技术及其产品订正方法的提高和改进, 各种陆基和空基雷达能够获取区域以至全球降雨的高分辨率时空四维分布, 在国际上已广泛应用于天气预报、气候分析和水文预报等领域。上述新技术新方法极大地推动了分布式水文模型的发展与应用, 对于降雨时空分布、流域水文模拟与预报、天气系统 (如台风等) 发展过程、气候变化等研究均有重要意义。本研究在淮河流域建立 10 km × 10 km 网格分辨率的分布式水文模型, 分析热带降雨观测计划 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)^[9] 卫星雷达降雨数据产品的质量, 并将其应用到流域陆面水文过程研究。

1 研究区域与模型介绍

1.1 研究区域

淮河流域地处中国东部南北气候过渡带, 位于东经 111°55' ~ 121°25', 北纬 30°55' ~ 36°36', 流域面积 27 万 km², 蚌埠站集水面积 13.2 万 km²。淮河流域多年平均降水量约为 888 mm, 人口密度高, 是中国重要的工农业产区。流域西部、西南部及东北部为山区丘陵区, 其余为广阔的平原。特殊的地形和地理位置, 加之东亚季风

收稿日期: 2008-07-02

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT0717); 财政部科技部公益类行业专项 (GYHY200706005); 国家自然科学基金资助项目 (40575040; 50679018); 高等学校学科创新引智计划资助项目 (B08048)

作者简介: 杨传国 (1981 -), 男, 山东青州人, 博士研究生, 主要从事环境与水文水资源研究。E-mail: chgyang @gmail.com

特性,使得该流域历史上极端旱涝灾害事件频繁。近年来在全球变暖的背景下,淮河流域极端事件有增多增强的趋势,严重威胁着该区域水资源安全和工农业经济的可持续发展。

1.2 陆面水文模型结构

分布式陆面水文模型^[10]利用“基于土壤含水量”的尺度转换方法耦合了粗网格的陆面模型(LSX)^[11]和细网格的水文模型。其中陆面模型中土壤分为6层,植被分为草地和树木两层,计算每个粗网格的水分、能量和动量过程,包括蒸散发量、产流量和下渗量等。细网格水文模型采用了水文模型系统(HMS)^[13,12]的3个主要模块:地表水模块、地下水模块和河流-地下水相互作用模块,计算每个细网格的地表和地下水分运动过程,并模拟河流湖泊和地下水的相互作用。LSX是大气模型GENESIS中的陆面模块,这种耦合模型结构便于实现水文模型与大气模型的耦合。

1.3 模型数据库

流域地表高程取自USGS HYDRO1KDEM数据库,投影方式为Lambert方位角投影。采用实际河网控制汇流路径的真实性,生成淮河流域10 km × 10 km网格分辨率的数字流域参数库,包括高程、高程偏差等^[10,13]。河道宽度和深度根据流域地貌经验关系确定。水文地质参数设定依据为中国1400万水文地质分类数据库。粗网格陆面模式的参数包括植被类型和每层的土壤质地数据,采用全球分布数据源。耦合模型的基本气象强迫数据采用的是NCEP/NCAR 6 h再分析数据库,其中降雨采用雨量站观测数据和TRMM卫星雷达数据作为模型输入,以真实地模拟陆面水文过程。

2 TRMM 降雨数据验证

2.1 TRMM 计划

TRMM计划由美国宇航局(NASA)和日本宇航局(JAXA)联合发起,卫星于1997年11月28日成功发射,轨道为圆形,倾角35°,初始高度350 km。卫星搭载的探测器包括:微波成像仪TMI、降雨雷达PR、可见/红外辐射仪VIRS、雷电探测器LIS以及云和地球辐射能量探测器CERES等^[9]。从1998年开始提供TRMM PR数据等系列产品,包括众多未知海洋和大陆区域的降雨和潜热通量时空四维分布的详细数据集。覆盖区域最初为全球35°S~35°N,目前已扩展到全球50°S~50°N区域,包括东北地区50°N以南的中国所有面积。TRMM卫星雷达降雨数据分为4级,从原始的回波资料(0级)到降雨资料的时空平均值产品(3级)^[14]。本研究采用TRMM 3B42卫星雷达降雨产品,3B42算法是由TRMM科学小组开发的一种综合降水评估算法,它结合了2B31、2A12、微波成像专用传感器SSM/I、高级微波扫描辐射计AMS/R、高级微波探测器AMSU等多种高质量的降水评估算法,并对地球同步红外观测系统获得的红外辐射资料进行了校准。该数据的空间网格分辨率为0.25°×0.25°,时间步长为3 h。

2.2 数据质量验证

利用淮河流域1998~2000年共3年的30个雨量站点的实测逐日降雨资料为标准,检验TRMM 3B42降雨数据质量。采用反距离权重法分别把站点观测数据和TRMM降雨数据插值成相同分辨率的格点资料,得到淮河流域逐日面平均降雨量。

表1列出了两组降雨数据的多个统计指标,结果表明不同年份的降雨总量误差均在±6%之内,两组数据离散度相近;1998年TRMM数据的最大1 d降雨量和最大5 d降雨量较观测值有所偏大,而在其它两年表现较好;两组序列在逐日和逐月时间尺度上均具有较高的相关性。

逐日累积降雨量过程线(图1)表明淮河流域不同年份的汛期起止时间不同,主要集中在每年的6~8月。年内不同丰枯季节TRMM 3B42降雨过程与观测降雨过程相比一致,3组数据序列相关性均达到99.9%。其中1998年、1999年吻合更好,2000年8月TRMM数据与观测降雨比较误差稍大,这是造成其在水文研究应用中的误差的主要原因。

表 1 淮河流域面平均逐日降雨观测序列与 TRMM 数据序列统计比较

Table 1 Statistics of daily observed rainfall and averaged TRMM rainfall series in the Huaihe River basin

| 年份 | 项目 | 平均值 /(mm d ⁻¹) | 标准差 /(mm d ⁻¹) | 最大 1 d 雨量 /mm | 最大 5 d 雨量 /mm | 相关系数 逐日/逐月 |
|------|---------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|---------------|
| 1998 | TRMM 降雨 | 2.72 | 6.22 | 45.2 | 188.6 | 0.64/0.98 |
| | 观测降雨 | 2.83 | 5.72 | 37.8 | 143.0 | |
| 1999 | TRMM 降雨 | 2.11 | 4.43 | 32.6 | 131.7 | 0.62/0.94 |
| | 观测降雨 | 2.02 | 4.49 | 45.1 | 136.5 | |
| 2000 | TRMM 降雨 | 2.84 | 6.45 | 56.2 | 207.2 | 0.65/0.98 |
| | 观测降雨 | 2.68 | 6.02 | 47.2 | 192.2 | |

降雨过程受天气、地形等因素影响,具有高度的空间分布不均匀性。选取 2000 年 7 月 15 日淮河流域降雨事件分析 TRMM 雷达降雨和站点观测值的空间分布(图 2)。结果表明 TRMM 降雨和观测降雨的空间分布一致,主雨带均位于流域北部,且雨量站点观测最大值分布在 TRMM 降雨强度中心地带;同时 TRMM 降雨数据显示,在没有雨量站点布设测量的地方,还存在其它降雨高值中心(如苏北地区),雨带边缘极少数格点与实测降雨量相比误差较大。

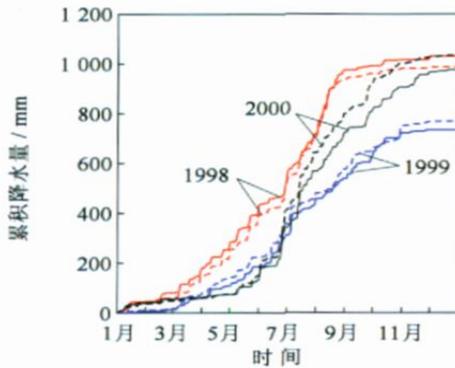


图 1 淮河流域逐日累积降雨量对比图

Fig. 1 Comparison of daily accumulated rainfall from Huaihe basin

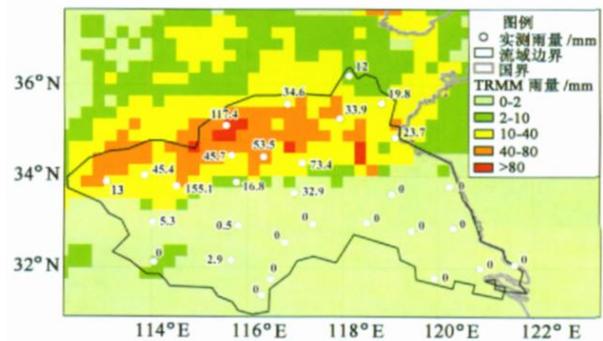


图 2 淮河流域站点观测降雨量与 TRMM 3B42 降雨量空间分布对比图

Fig. 2 Spatial distribution of gauged rainfall vs TRMM 3B42 rainfall from Huaihe basin

3 水文过程模拟

利用淮河流域蚌埠站 1980~1987 年实测流量资料对耦合模型进行率定,逐日序列相关系数可达到 0.90 以上,效率系数达 0.80 以上(图略);同时生成流域 10 km ×10 km 网格分辨率的重启动文件,该文件包括地下水位、土壤含水量等多个变量的初始值。利用上述模型参数和初始值,结合 NCEP/NCAR 再分析数据,分别利用实测降雨和 TRMM 3B42 卫星雷达降雨,进行淮河流域 1998~2003 年共 6 年的连续性陆面水文过程模拟。

3.1 模拟结果

蚌埠站流量过程线表明(图 3),由 TRMM 降雨数据得到的逐月流量过程与观测降雨得到的流量过程基本吻合一致。两组序列的相关系数为 0.89,水量平衡系数为 0.95,模拟结果精度相当。仅 2000 年洪峰出现月份不同,与 2.2 节中 TRMM 降雨数据检验得到的结果一致。与实测流量相比,TRMM 降雨得到的模拟结果同样具有较高精度,1998~2003 年的相关系数为 0.84,效率系数为 0.70,2001~2003 年的相关系数为 0.94,效率系数为 0.86;TRMM 降雨模拟流量略有偏大,模拟期的水量平衡系数为 1.22,在一定程度上反映了近年来枯水年份(如 1999 和 2001 年)和枯水季节内人类活动等非自然因素对流域水资源的影响。对于 2003 年的洪峰峰值模拟偏小,原因可能在于 TRMM 降雨数据总量或强度偏小,以及耦合模型本身未能准确模拟一些小尺度流域的暴雨洪水过程。

蚌埠站对数坐标散点图(图 4)同样证实 TRMM 降雨模拟结果与观测降雨模拟结果具有很高的一致性。由于

模拟过程中未考虑人为作用影响，与实测流量相比，模拟偏差主要出现在人类活动影响明显的枯水年份和枯水季节，如2001年6~11月。由于上游闸坝等拦水建筑物和取水活动的影响，该时期内蚌埠站有多个时段逐日实测流量值为0，而模拟结果体现了自然条件下的河流流量。总体上，TRMM 3B42 降雨数据对枯水期、洪水期以及丰枯年份的模拟，均达到了令人满意的结果。

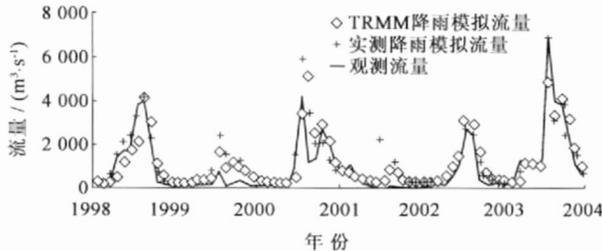


图3 蚌埠站观测降雨和 TRMM 雷达降雨数据的模拟流量与观测流量过程

Fig. 3 Monthly series of observed and simulated streamflows with TRMM 3B42 and gauged rainfall data from Bengbu station

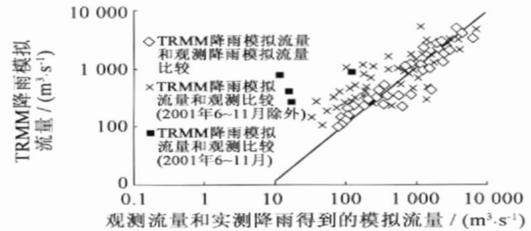


图4 蚌埠站 TRMM 降雨模拟流量与观测降雨模拟流量及实测流量散点图

Fig. 4 Scatter plots of the simulated streamflow with TRMM rainfall vs. the simulated with gauged rainfall along with observed streamflow from Bengbu station

3.2 空间分布分析

准确模拟和预报陆面水文过程各个环节变量的空间分布，对于真实反映流域水文状况，进行流域综合预报预警和统筹水资源规划都具有重要意义。图5显示了典型干旱年(2001年)和洪涝年(2003年)的年平均流量空间分布

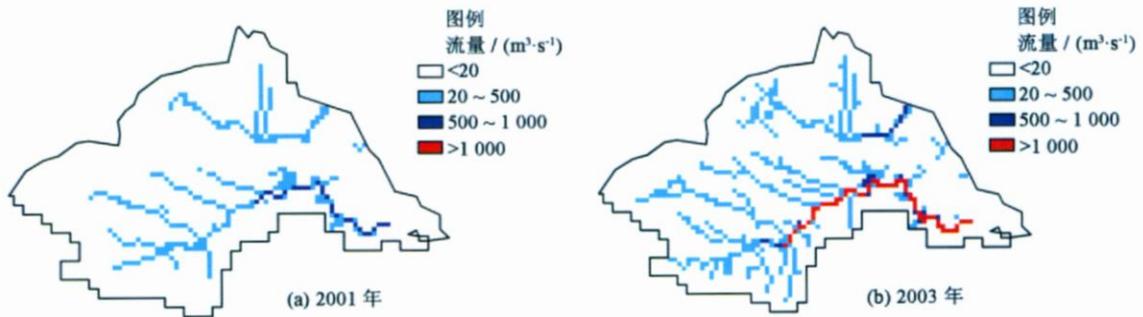


图5 旱涝不同年份的模拟流量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of simulated streamflow in drought and flood years

分布(小于 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 的河道网格未给出)，可见干旱年份的河网密度明显低于洪水年份，同时网格流量的量值也有很大差别，在干旱年份主河道的年平均流量均小于 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，而在洪水年份从王家坝站附近以下主河道的年平均流量均大于 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。图6给出了典型年份淮河流域网格流量的统计分布。结果表明干旱年份(2001年)的网格流量在不同等级上均小于洪水年份(2003年)，其中前者小于5、10和 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 的网格数分别比后者多出了流域网格总数(2690个)的16%、10%和8%。河道流量等水文要素的时空变化体现了淮河流域旱涝极端事件的高度非均匀性，对于反映流域洪水的时空演化过程有重要意义。

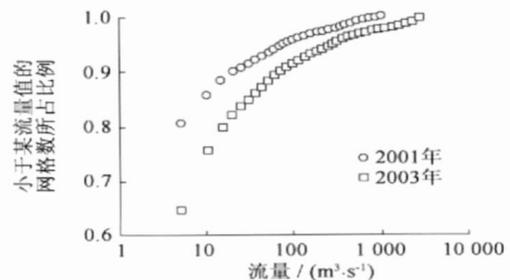


图6 旱涝不同年份的网格流量频率分布

Fig. 6 Frequency distributions of grid streamflow in drought and flood years

4 结 论

本文分析验证了 TRMM 卫星雷达降雨资料的精度,并将其引入到流域陆面水文过程研究。结合雨量站点观测数据和 NCEP/NCAR 再分析资料,采用 10 km ×10 km 网格分辨率的分布式陆面水文模型进行淮河流域 1998~2003 年共 6 年的连续性水文模拟。结果表明,TRMM 降雨数据能够准确地描述降雨过程的时空分布,其模拟结果与观测降雨的模拟结果精度相当;与实测流量过程比较,TRMM 降雨数据模拟结果亦能达到很高的精度。旱涝年份模拟变量的时空分布表明,近年来人类活动对河川径流的影响不可忽视,尤其在枯水季节。本研究为拓展雷达降雨产品在流域陆面水文过程研究中的应用提供了借鉴和参考。

参考文献:

- [1] BEVEN K, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [2] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to European hydrological system - Systeme Hydrologique Europeen (SHE) Part 1: History and philosophy of physically based distributed modeling system[J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1/2): 45-59.
- [3] YU Z, LAKHTAKIZ M, YARNAL B, et al. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and a hydrologic model system[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 218: 72-91.
- [4] 李璐,夏军,叶爱中,等.基于雷达测雨的降水数据同化研究[J]. *人民长江*, 2006, 37(9): 95-97. (LILu, XIA Jun, YE Ai-zhong, et al. Research on precipitation data assimilation detected by radar[J]. *Yangtze River*, 2006, 37(9): 95-97. (in Chinese))
- [5] KRZYSTOFOWICZ R. The case for probabilistic forecasting in hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 249: 2-9.
- [6] 杨扬,张建云,戚建国,等.雷达测雨及其在水文中应用的回顾与展望[J]. *水科学进展*, 2000, 11(1): 92-98. (YANG Yang, ZHANG Jian-yun, QI Jian-guo, et al. Review and prospect on the application of weather radar in hydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(1): 92-98. (in Chinese))
- [7] 魏林宏,郝振纯,邱绍伟.雷达测雨在水文学中的应用——影响预报精度的因素分析[J]. *水利水电技术*, 2004, 35(5): 1-4. (WEI Lin-hong, HAO Zhen-chun, QIU Shao-wei. Application of radar rainfall measurement to hydrology[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2004, 35(5): 1-4. (in Chinese))
- [8] 李致家,刘金涛,葛文忠,等.雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2004, 32(6): 601-606. (LI Zhi-jia, LIU Jin-tao, GE Wen-zhong, et al. Coupling of weather radar rainfall data with hydrological model and its application to flood forecasting[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2004, 32(6): 601-606. (in Chinese))
- [9] KUMMEROW C, BARNES W, KOZU T, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15: 809-817.
- [10] YU Z, POLLARD D, CHENG L. On continental-scale hydrologic simulations with a coupled hydrologic model[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331: 110-124.
- [11] POLLARD D, THOMPSON S. Use of a land-surface-transfer scheme (LSX) in a global climate model: The response to doubling stomatal resistance[J]. *Global Planetary Change*, 1995, 10: 129-161.
- [12] 余钟波,潘峰,梁川,等.水文模型系统在峨嵋河流域洪水模拟中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5): 645-652. (YU Zhong-bo, PAN Feng, LIANG Chuan, et al. Application of hydrologic model system to the flood simulation in the Emei stream watershed[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(5): 645-652. (in Chinese))
- [13] 杨传国,余钟波,林朝晖,等.大尺度分布式水文模型数字流域提取方法研究[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 68-76. (YANG Chuan-guo, YU Zhong-bo, LIN Zhao-hui, et al. Method study of constructing digital watershed for large-scale distributed hydrological model[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(1): 68-76. (in Chinese))
- [14] HUFFMAN G, ADLER R, BOLVIN D, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8: 38-55.

Study on watershed hydrologic processes using TRMM satellite precipitation radar products*

YANG Chuan-guo^{1,2}, YU Zhong-bo^{1,3}, LIN Zhao-hui², HAO Zhen-chun¹, WANG Zhen-long⁴, LI Min²

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

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Department of Geoscience, University of Nevada, Las Vegas, Las Vegas 89154, USA;

4. Huaihe Water Resources Research Institute, Anhui and Huaihe Water Conservancy Committee, Bengbu 233000, China)

Abstract : The objective of this study focuses on the application of the TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) satellite precipitation radar data in the simulation of the land surface hydrologic processes and the evaluation of its performance in hydrologic simulation and forecast. The quality of the TRMM 3B42 rainfall data is validated with the gauged rainfall data in a 3-year period. Forced by the gauged and TRMM 3B42 rainfall data, two continuous hydrologic simulation cases are conducted to analyze the temporal variability and the spatial distribution of the hydrologic process in Huaihe River basin from 1998 to 2003. The analyses show that the TRMM rainfall is comparable to the gauged rainfall data in the hydrologic study. The simulated streamflow hydrograph with the TRMM rainfall is also consistent with the observed one at Bengbu station. Results indicate that the satellite radar rainfall has a promising prospect in the study of the land surface hydrologic processes.

Key words : Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) ; satellite radar precipitation data ; hydrologic processes ; hydrologic model ; temporal and spatial scales

中国水利学会第九次全国会员代表大会在北京召开

中国水利学会第九次全国会员代表大会于 2009 年 5 月 25 日在北京隆重召开。水利部部长陈雷出席会议并作重要讲话。中国科协书记处书记冯长根到会讲话。水利部副部长鄂竟平, 中纪委驻水利部纪检组长董力, 水利部副部长周英、胡四一、刘宁, 水利部老部长杨振怀、老领导张印忠出席开幕式。中国水利学会理事长敬正书作八届理事会工作报告。中国水利学会常务副理事长顾浩主持会议。

大会是在我国全面建设小康社会、构建和谐社会和创建创新型国家, 全党和全国各族人民深入学习贯彻科学发展观和党的十七大、十七届三中全会精神, 各行各业积极应对国际金融危机的形势下召开的一次重要会议。会议的主要任务是: 审议八届理事会工作报告和财务报告, 审议《中国水利学会章程》修改报告, 选举产生中国水利学会第九届理事会、常务理事。

大会邀请了水利部刘宁副部长和农业部原副部长路明分别作了“汶川地震大坝抗震安全与堰塞湖应急处置实践”和“粮食安全与水资源危机”的学术报告。出席本次大会的还有水利部各业务司局领导、学会八届名誉理事、水利界知名专家、兄弟学会的嘉宾, 以及学会各分支机构、团体会员(含省级学会)和流域机构、地方水行政主管部门、各水利企事业单位及有关院校的领导和代表。

贺瑞敏

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40575040 ;50679018).