

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.03.008

基于杭嘉湖平原河网模型的嘉善水厂断面水质达标分析

朱铭铭¹, 逢勇^{1,2}, 谢蓉蓉¹, 王健健¹, 徐凌云¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:针对杭嘉湖平原地区河网特征, 基于 MIKE11 软件建立杭嘉湖河网水环境数学模型, 并对模型进行率定验证。率定得到河道糙率在 0.025 ~ 0.05 之间, COD_{Mn} 降解系数在 0.08 ~ 0.12/d 之间, NH₃-N 降解系数在 0.07 ~ 0.10/d 之间; 验证得到水位相对误差小于 10%, COD_{Mn} 和 NH₃-N 的降解系数平均误差分别为 11% 和 20%, 模型计算值和实测值吻合良好。基于已建立的模型对研究区域的内外源权重及嘉善水厂断面水质进行达标分析, 结果表明: ①区域内部污染源对嘉善水厂断面影响大于区域外部污染源影响, COD_{Mn} 和 NH₃-N 的内源权重分别为 55.4% 和 67.2%; ②为使嘉善水厂断面水质达标, COD_{Mn} 需削减 68%, NH₃-N 需削减 75%。

关键词: MIKE11 模型; 率定验证; 断面达标; 内外源权重; 平原河网; 杭嘉湖地区

中图分类号: X824

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2013)03-0034-05

Up-to-standard analysis of water quality based on Hangjiahu plain river network model: A case study of Jiashan waterworks section

ZHU Mingming¹, PANG Yong^{1,2}, XIE Rongrong¹, WANG Jianjian¹, XU Lingyun¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the characteristics of river networks in the Hangjiahu plain region, a water environment mathematical model was established with the MIKE 11 software, and was calibrated and validated. The calibration results of the model show that the roughness values of the river channels ranged from 0.025 to 0.05, the values of the COD_{Mn} degradation coefficient ranged from 0.08 per day to 0.12 per day, and the values of the NH₃-N degradation coefficient ranged from 0.07 per day to 0.1 per day. The validation results of the model show that the relative error of the water level was less than 10%, while the average errors of COD_{Mn} and NH₃-N concentrations were 11% and 20%, respectively. Based on these results, we can see that the simulated results of the established model fit the measured results well. With the established model, we analyzed the weight parameters of the contributions of pollution sources both inside and outside the study area and conducted an up-to-standard analysis of the water quality at the Jiashan waterworks section. The results show the following: (1) the contribution of internal pollution sources in the study area to the water quality of the Jiashan waterworks section was greater than that of the external pollution source; the weight parameter of the internal COD_{Mn} was 55.4%, and the internal NH₃-N was 67.2%; and (2) to ensure that the water quality in the Jiashan waterworks section can reach the standard, the amount of COD_{Mn} needs to be reduced by 68%, and the amount of NH₃-N needs to be reduced by 75%.

Key words: MIKE 11 model; calibration and validation; up-to-standard section; weights of internal and external pollution sources; plain river network; Hangjiahu region

杭嘉湖平原位于中国浙江省北部, 是浙江最大的堆积平原, 位于太湖以南, 钱塘江和杭州湾以北, 天目山以东, 包括嘉兴市全部, 湖州市大部以及杭州市的

东北部, 面积约 7 620 km²。杭嘉湖平原地势低平, 河网密布, 平均海拔 3 m 左右, 河网密度 3.8 km/km², 水面率约 10%。南部杭州湾沿岸一带水面率较小, 为

基金项目: 国家自然科学基金 (51179053); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07506-006, 2012ZX07506-007)

作者简介: 朱铭铭 (1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水资源规划与保护。E-mail: zhumm_1202@126.com

4% ~ 6%; 北部和东北部一带水面率较大, 为 12% ~ 17%, 有京杭大运河穿过。

近年来, 随着经济、社会的发展, 杭嘉湖平原河网水质性缺水日益严重, 不仅影响市民的日常生活, 对该地区的经济发展也形成了一定制约。

为了研究并解决河流污染问题, 国内外先后出现了很多运用广泛的水环境数学模型运算软件, 其中运用比较成熟的有 DHI 公司开发的 MIKE 系列软件, 美国国家环境保护局 (USEPA) 于 1983 年开发并逐步修订完善的 WASP 模型^[1], 最初由美国得克萨斯州水利发展部 (Texas Water Development Board) 开发, 后来经过 USEPA 等机构修改并完善的 QUAL 系列模型^[2], 20 世纪 90 年代美国农业部农业研究中心 (USDA-ARS) 开发的 SWAT 模型^[3] 等。曾剑等^[4] 采用由 MIKE 系列软件构建了温瑞塘河河网水质模型, 对河网水质变化趋势进行了验证和预测; 廖振良等^[5] 应用 WASP 模型进行水质模拟预测, 分析了苏州河水质变化的趋势和水质达标需要削减的污染物质; 方晓波等^[6] 联合 QUAL2K 模型及一维水质模型, 对钱塘江水体纳污能力进行了计算分析; 唐莉华等^[7] 应用模型对温榆河流域不同水平年的径流、泥沙和非点源污染负荷进行了模拟计算, 对流域内点源和非点源污染的贡献率进行了分析。

笔者在水文、水质例行监测基础上, 利用丹麦水力学所的 MIKE11 软件建立了杭嘉湖平原河网水动力-水质数学模型, 模拟杭嘉湖地区水环境, 选取 1 个重点控制断面 (嘉善水厂) 进行内外源水质影响的权重分析, 提出该断面的水质达标方案。

1 基本方程

1.1 水动力模型

在 MIKE11 模型中, 描述一维河网非恒定流的水动力模型控制方程为 Saint-Venant 微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q |Q|}{C^2 AR^2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为过水断面面积; Q 为流量; x 为距离坐标; t 为时间坐标; g 为重力加速度; h 为水位; q 为单位河段长度的旁侧入流流量; C 为谢才系数; R 为水力半径; α 为动量校正系数。

利用 Abbott 六点隐式格式^[8] 离散控制方程组, 离散格式在每一个网格点按顺序交替计算水位或流量。

1.2 水质模型

本文采用 MIKE11 模型系统中的对流扩散模块

(AD) 和水质反应模块 (ECOLab), 对 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 这两个有较大影响的污染因子进行模拟。

对流扩散模块的控制方程是建立在质量守恒基础上的对流扩散方程, 该方程假设物质在断面上完全混合:

$$\frac{\partial (A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial (A\rho)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = -AK\rho + \rho_2 q \quad (2)$$

式中: ρ 为水流输送物质的浓度; E_x 为纵向扩散系数; ρ_2 为源/汇项的浓度; K 为污染物降解系数。

MIKE11 对流扩散模块利用时间和空间中心隐式差分格式^[9] 求解上述方程。

在水质反应模块中, 考虑 DO、BOD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN、有机磷、TP 和 COD_{Mn} 这几种物质之间的交互作用, 利用 ECOLab 模块模拟这几种物质的物理、化学及生物反应过程。

对流扩散模块与水质反应模块耦合运行, 采用龙格库塔法^[10] 进行积分求解, 得到污染物质的浓度。

2 模型建立及率定验证

2.1 模型的建立

2.1.1 河网概化

本文建立模型区域为杭嘉湖平原河网, 杭嘉湖地区河流纵横交错、成网状分布, 水系十分复杂, 因此需对河网进行合理的概化。本文在充分掌握杭嘉湖平原河网水动力、水文资料的基础上, 以主干河道为基础, 按照河网概化的基本原则, 对杭嘉湖流域河网进行了合理的概化。概化后河网如图 1 所示。

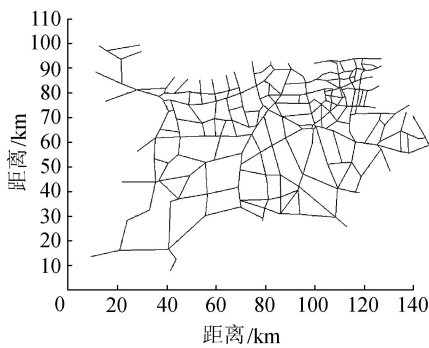


图 1 杭嘉湖河网概化图

2.1.2 边界条件

模型计算范围涵盖整个杭嘉湖流域, 共设置 31 个计算边界, 所有边界水动力条件均采用 2009 年全年水位过程。

2.1.3 污染源概化

本次计算依据浙江省 2009 年污染源普查资料^[11] 得到杭嘉湖平原河网地区 2009 年 COD_{Mn} 入河

量为 34.68 万 t/a, $\text{NH}_3\text{-N}$ 入河量为 3.76 万 t/a。

在统计杭嘉湖流域污染源的基础上,点源按其排污口所在河道输入模型,面源则平均分配到各相应河段上。

2.2 模型率定验证

模型对杭嘉湖河网的 14 个水文站点及 15 个水质站点进行了全面验证。站点位置见图 2。



图 2 水文及水质站点位置

2.2.1 水动力模型率定

根据 2009 年全年的野外水文水质同步监测成果,对水动力模型进行率定。边界条件采用实测水位过程。采用试错法进行率定,即根据部分断面实测的水位资料,调试各河道的糙率,使得计算水位过程与实测水位相吻合,率定得出河道糙率在 0.025 ~ 0.050 之间。部分验证点位水位计算值与实测值的对比如图 3 所示。

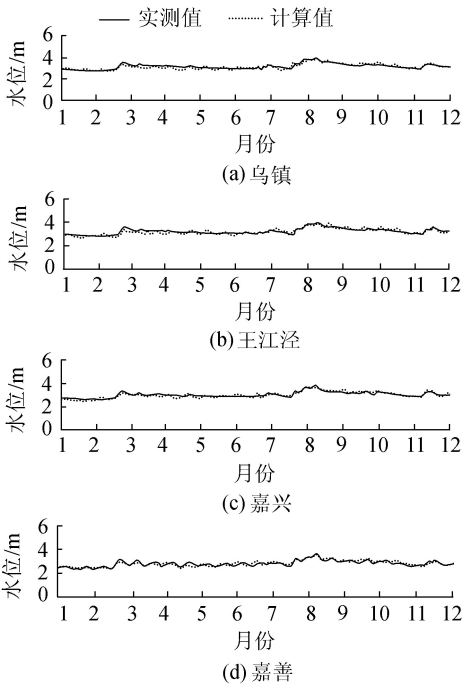


图 3 2009 年部分验证点位水位实测值与计算值比较

2.2.2 水质模型率定

杭嘉湖河网水质模型参数主要选取 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的降解系数进行取值,结合流域水力特征,率定得到的 COD_{Mn} 降解系数为 0.08 ~ 0.12/d, $\text{NH}_3\text{-N}$ 降解系数为 0.07 ~ 0.10/d。部分验证点位 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度计算值与实测值的对比如图 4 ~ 5 所示。

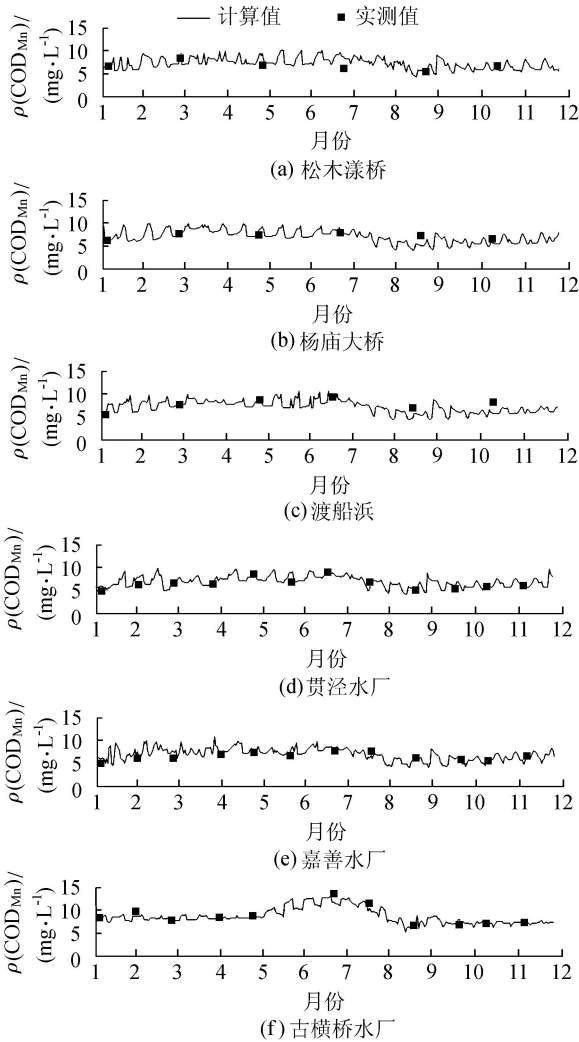


图 4 2009 年部分验证点位实测 COD_{Mn} 与计算值比较

通过部分率定结果图对比可知,水位与水质两者均吻合较好。对 14 个水文监测断面水位率定以及对 15 个水质监测断面水质率定统计得到,水位相对误差小于 10%, COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度计算值平均误差分别为 11% 及 20%,在建模误差允许范围内。因此所建立的流域河网水动力、水质模型合理可信,能较准确地模拟该流域水质状况。

3 水质达标方案分析

3.1 内外源权重分析

根据 2009 年污染源普查资料及嘉善水厂断面实测资料,确定研究区域主要污染物质为 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。

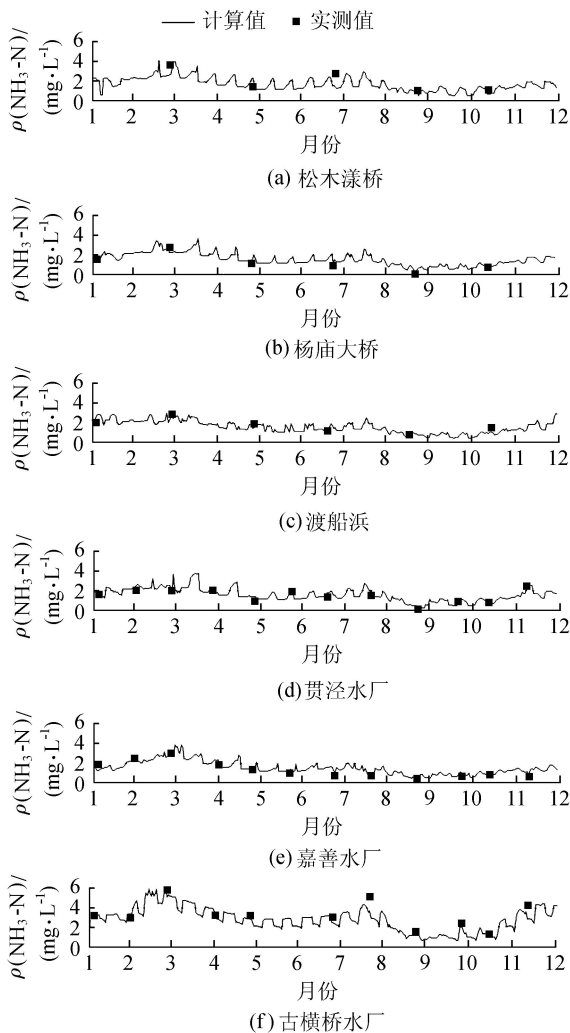


图5 2009年部分验证点位 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度
实测值与计算值比较

内源外影响权重计算公式为

$$\alpha_i = \frac{\rho_i}{\rho_i + \rho_0} \quad \alpha_0 = \frac{\rho_0}{\rho_i + \rho_0} \quad (3)$$

式中: α_i 为研究区域内部污染源所占的权重; α_0 为研究区域外部污染源所占的权重; ρ_i 为边界取功能区目标水质时, 考虑内部污染源排放情况下按水质模型计算得出的控制断面水质浓度; ρ_0 为边界取实测水质时, 不考虑内部污染源排放情况下按水质模型计算得出的控制断面的水质浓度。

利用本文所建立的杭嘉湖平原河网模型, 在水文、水质例行监测资料的基础上: 边界水质取功能区目标水质, 模型考虑研究区域内部污染源排放, 根据内源权重计算公式, 得出 COD_{Mn} 内源权重为 55.4%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 内源权重为 67.2%; 边界取实测水质, 模型不考虑研究区域内部污染源排放, 根据外源权重计算公式, 得出 COD_{Mn} 外源权重为 44.6%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 外源权重为 32.8%。由此可见研究区域内源对嘉善水厂断面的影响较大。

3.2 水质达标削减方案

根据《浙江省地表水(环境)功能区划》的要求, 嘉善水厂断面应达到Ⅲ类水质标准。由于研究区域内源对嘉善水厂断面的影响较大, 故本文重点研究内部污染源在不同削减率下对嘉善水厂断面水质的改善情况。

在模型边界取功能区目标水质的前提下, 分别模拟研究区域污染源(包括工业点源、污水处理厂和农村面源)削减 10%、30%、50% 和 80% 下嘉善水厂断面的水质改善情况, 并计算嘉善水厂断面水质达到功能区值时, 研究区域污染源的削减率。经计算, 在边界水质达标的情况下, 要使嘉善水厂断面水质达到功能区目标水质, 研究区域内 COD_{Mn} 质量浓度需削减 68%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度需削减 75%。

研究区域污染源负荷在不同削减率下的嘉善水厂断面水质改善状况如图 6 所示。

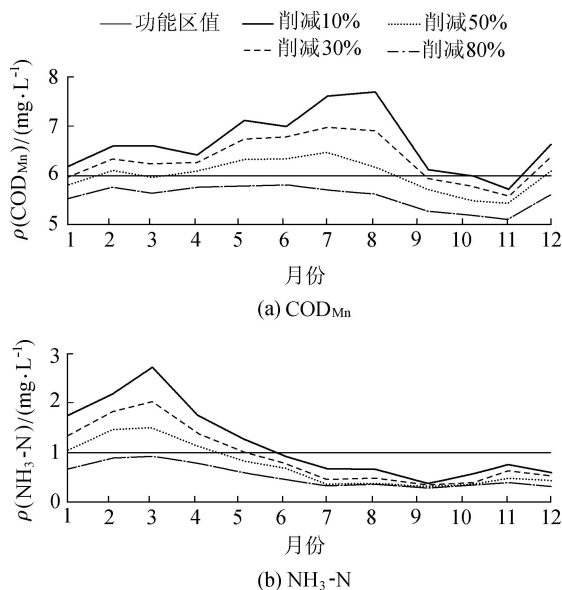


图6 2009年污染源在不同削减率下的
 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度对比

4 结 语

笔者从重点断面水质达标出发, 利用 MIKE11 软件包建立了杭嘉湖平原河网水环境数学模型, 并对水文和水质进行了率定验证。由率定验证结果得知模型参数选取合理, 计算值和实测值吻合良好。

为确保嘉善水厂断面水质达标, 研究区域内的点源污染负荷可以通过提高城镇污水处理厂的接管率、调整工业产业结构布局和对部分工业企业进行提标改造等措施进行削减; 面源污染负荷可以通过畜禽与水产养殖污染控制、种植田地结构调整和农村环境连片整治等措施进行削减。

参考文献：

[1] 陈美丹,姚琪,徐爱兰. WASP 水质模型及其研究进展 [J]. 水利科技与经济,2006,12 (7) :421-426. (CHEN Meidan,YAO Qi,XU Ailan. WASP water quality model and its advance in research [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2006,12 (7) :421-426. (in Chinese))

[2] 周华. 河流综合水质模型 QUAL2K 应用研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报,2010,8 (1) :71-75. (ZHOU Hua. Application research of a river water quality model QUAL2K [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2010,8 (1) :71-75. (in Chinese))

[3] 赖格英,吴敦银,钟业喜,等. SWAT 模型的开发与应用进展 [J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40 (3) :243-251. (LAI Geying,WU Dunyin,ZHONG Yexi,et al. Process in development and applications of SWAT model [J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2012,40 (3) :243-251. (in Chinese))

[4] 曾剑,楼越平,程杭平. 温瑞塘河网河水质模型研究 [J]. 浙江水利科技,2006 (1) :41-43. (ZENG Jian,LOU Yueping,CHENG Hangping. Research on water quality model of Wenruitang River network [J]. Zhejiang Hyrotechnics,2006 (1) :41-43. (in Chinese))

[5] 廖振良,徐祖信,高廷耀. 苏州河环境综合整治一期工程水质模型分析 [J]. 同济大学学报,2004,32 (4) :499-502. (LIAO Zhenliang,XU Zuxin,GAO Tingyao. Analysis on the first stage of Suzhou Creek rehabilitation project based on water quality model [J]. Journal of Tongji University,2004,32 (4) :499-502. (in Chinese))

[6] 方晓波,张建英,陈伟,等. 基于 QUAL2K 模型的钱塘江流域安全纳污能力研究 [J]. 环境科学学报,2007,27 (8) :1402-1407. (FANG Xiaobo,ZHANG Jianying,CHEN Wei,et al. Assimilative capacity of the Qiantang River watershed based on a QUAL2K model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2007,27 (8) :1402-1407. (in Chinese))

[7] 唐莉华,林文靖,张思聪,等. 基于 SWAT 模型的温榆河流域非点源污染模拟与分析 [J]. 水力发电学报,2010,29 (4) :6-13. (TANG Lihua,LIN Wenjing,ZHANG Sicong,et al. Simulation and analysis of non-point source pollution based on swat model for the Wenyu River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29 (4) :6-13. (in Chinese))

[8] 邢可霞,郭怀成,孙延风,等. 基于 HSPF 模型滇池流域非点源污染模拟 [J]. 中国环境科学,2004,24 (2) :229-232. (XIN Kexia,GUO Huaicheng,SUN Yanfeng,et al. Simulation of non-point source pollution in Lake Dianchi Basin based on HSPF model [J]. China Environmental Science,2004,24 (2) :229-232. (in Chinese))

[9] 马强,陈福荣,王颖. 基于 MIKE11ECOLab 模型的梁滩河流域水污染问题探讨 [J]. 水电能源科学,2011,29 (11) :33-36. (MA Qiang,CHEN Furong,WANG Ying. Research on water pollution problem of Liangtanhe Basin based on MIKE 11 Ecolab model [J]. Water Resources and Power,2011,29 (11) :33-36. (in Chinese))

[10] 富明慧,梁华力. 一种改进的精细-龙格库塔法 [J]. 中山大学学报:自然科学版,2009,48 (5) :1-5. (FU Minghui,LIANG Huali. An improved precise Runge-Kutta integration [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2009,48 (5) :1-5. (in Chinese))

[11] 浙江省环境监测中心. 浙江省 2009 年污染源普查资料 [R]. 杭州:浙江省环境监测中心,2009.

(收稿日期:2012 - 10 - 11 编辑:高渭文)

· 简讯 ·

水文水资源与水利工程科学国家重点实验室接受科技部现场评估

2013 年 3 月,受国家科技部委托,国家自然科学基金委组织专家对水文水资源与水利工程科学国家重点实验室进行现场评估。专家组召开了评估报告会,实验室主任彭世彰教授就 5 年来实验室的研究水平与贡献、队伍建设与人才培养、开放交流与运行管理等作了工作汇报,张建云院士、任立良教授、唐洪武教授、陆永军教高、顾冲时教授分别作代表性成果学术报告。河海大学校长王乘教授、副校长徐卫亚教授、南京水利科学学院院长张建云院士、副院长李云教高、副院长戴济群教高等依托单位领导出席了现场评估报告会,吴中如院士和团队学术带头人以及研究骨干参加会议。在现场考察中,评估专家组分别考察了实验室公共实验平台、水环境综合治理实验厅和水工新材料试验厅以及铁心桥试验基地等,对实验室的工作状态、研究工作情况、仪器设备运行和共享、人才队伍建设和对外开放、管理工作等进行检查,核实科研成果,抽查实验记录,并进行个别访谈等。

国家重点实验室在本评估期围绕 5 个研究方向开展水科学应用基础研究,突出重大工程关键技术创新。实验室主持了“973”计划项目、国家自然科学基金重大计划项目等一批具有重大影响的国家级科研项目,在水资源演变及其对气候变化的响应评估、不同陆面特征的水文过程机理及模拟、平原河流水动力过程及防洪安全调控、河口海岸滩涂高强度开发与治理关键技术、重大水工程服役风险分析与调控理论和方法等方面取得了突出研究成果,尤其在气候变化和人类活动对流域水文过程的影响规律的探索、产汇流理论与水文模型的发展方面,为水文学领域的研究作出了重要贡献,在本学科领域具有突出的学术地位。

(本刊编辑部供稿)