DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.021

浙江温黄平原典型河流水质改善方案研究

逄 勇[1,2],王瑶瑶[1],胡绮玉[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:选取台州市东官河作为浙江温黄平原典型河流的代表,构建MIKE11河网水环境数学模型,基于水量、水质同步实测数据对模型进行率定验证。为保证东官河控制断面水质达标,综合考虑水文条件、污染物削减和引水3个方面因素,提出了9套研究区域模型计算方案。结果表明,近期区域内污染物削减60%,控制长潭水库调水量为2000万m^3时,东官河水质可达Ⅳ类;远期区域内污染物削减90%时,东官河水质基本可达Ⅲ类即功能区水质目标。本研究旨在为东官河水环境综合整治提供技术支撑。

关键词:水质;水量;水环境数学模型;模型率定;污染物削减;东官河;温黄平原;浙江省

中图分类号:X506 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2016)02-0100-06

Research on water quality improvement scheme for a typical river in Wenhuang Plain in Zhejiang Province

PANG Yong[1,2], WANG Yaoyao[1], HU Qiyu[1]

(1. *College of Environment*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*;
2. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes of Ministry of Education*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: In this study, the Dongguan River in Taizhou City was selected as a typical river of the Wenhuang Plain, in Zhejiang Province. The MIKE11 water environment mathematical model was established, and then calibrated and validated based on simultaneously monitored data of water quality and quantity. In order to ensure that the water quality in the control section of the Dongguan River would reach the standards, nine schemes for model calculation in the research area were used with comprehensive consideration of hydrologic factors, pollutant reduction, and water transfer. According to the results, in the recent period, as the proportion of pollutant reduction reached 60%, and the amount of water transferred from the Changtan Reservoir reached 20 million cubic meters, the water quality of the Dongguan River reached the grade Ⅳ level. For a long period, as the proportion of pollutant reduction reached 90%, the water quality of the Dongguan River almost reached the grade Ⅲ level, meeting the functional area requirement. This study aims to provide technical support for comprehensive environmental improvement of the Dongguan River.

Key words: water quality; water quantity; water environment mathematical model; model calibration; pollutant reduction; Dongguan River; Wenhuang Plain; Zhejiang Province

东官河位于浙江省台州市,主要流经台州市黄岩区以及椒江区城区,是台州市金清水系中的主要河流。东官河不仅担负行洪排涝的重任,也是下游市区以及平原河网区优质水源的输送通道。近年来,东官河由于管理不善,开始出现河道底泥淤积、断面缩窄的现象。再加上河流沿岸居民生活污水和企业废水未接入污水处理厂,垃圾乱堆乱放,致使河道防洪排涝功能下降,水体发黑发臭,生态环境急剧恶化,一度被当地人称为“黄岩黑河”。为有效改善东官河水质,提升人民生活质量和城市形象,开展东

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-002)

作者简介:逄勇(1957—),男,教授,主要从事环境规划与综合评价研究。E-mail:pangyonghhu@163.com

官河水环境综合整治任务十分迫切。

1925 年，Streefer 等[1-2]提出了 BOD/DO 水质模型及其衍生定常模型后，一维非稳态水质模型得到迅速发展。近几十年来，QUASAR[3-4]、MIKE 系列[5]、QUAL 系列[6]等商业模型不断应用在实际的水环境模拟与预测过程中，其中，MIKE 模型由于其操作简便、功能完善，被国内外学者广泛应用于众多科研项目和实际工程中，展现了该模型数值模拟方面的强大功能[7-8]。朱茂森等[9]采用 MIKE11 软件建立辽河流域水环境数学模型，计算出辽河流域污染物排放限值；付浩等[10]建立太湖重污染区水环境数学模型，分析不同水污染控制方案下 TN 改善效果。

平原河网地区城市内河河流水环境质量主要受不同水文条件、污染物排放和境外来水 3 个因素影响。目前，国内外学者对水环境整治研究多采用某一水文条件，单一考虑总量控制和引水方案对水环境的改善效果。孙卫红等[11]对不同污染物削减情况下通吕运河控制断面水质达标情况进行分析；卢士强等[12]针对上海平原河网感潮河网的特点，对不同调水方案下主要河流水质情况进行分析；王雪等[13]建立秃尾河流域水环境数学模型，对最枯月 90%、97% 水文保证率条件下的重要控制断面进行水质达标分析。大多学者研究多只针对单一或两个影响因素进行分析，将三者之间有机结合起来协同考虑的研究相对较少。

笔者基于研究区域水量、水质同步监测，建立东官河一维非稳态水环境数学模型，考虑在 90%、75% 的水文保证率条件下，从污染物削减和引水两个方面设计了 9 套水质改善计算方案，并进一步提出改善东官河水质的方案。

1　研究区概况

东官河横跨浙江省台州市黄岩区（江口街道、东城街道、南城街道、西城街道）和椒江区（葭芷街道），全长 17.425 km，其中 11.02 km 位于黄岩区，从黄岩的西江汇起，经黄岩城区直至椒江的永宁河，现状河宽 6.5 ~ 25 m，现状底高程 −0.9 ~ 3.3 m，河道总长 17.425 km。河流沿线分布有南官河、海门河、双龙河等 23 条支流。平原河网地区修建有大量闸控水利工程，其中研究范围内主要涉及的闸坝有坝头闸、山头径闸、栅浦闸、葭沚闸和江城排污闸，具体水系分布情况和闸坝位置分布见图 1（粗线河网表示本次野外调水的主干河网）。

2　水量水质同步监测及水环境数学模型建立

2.1　水量水质同步监测

为确定水体的流动情况以及水文水质的各项参数，在 2012 年 1 月 8—13 日开展了一次大规模的水量水质同步监测试验，本次在研究区域内共布设 18 个监测断面，监测点位见图 1。水文监测因子主要为流速、流量、水深和断面宽度等，水质监测因子为 COD 和 NH_3-N，实测数据时间尺度主要与闸坝开启情况和监测频率有关。采样和分析方法是按照 HJ/T 91—2002《地表水和污水监测技术规范》和《水和废水监测分析方法》的有关规定和要求进行。

2.2　水环境数学模型建立

2.2.1　基本方程

a. 水动力模型基本方程。水动力模型基本方

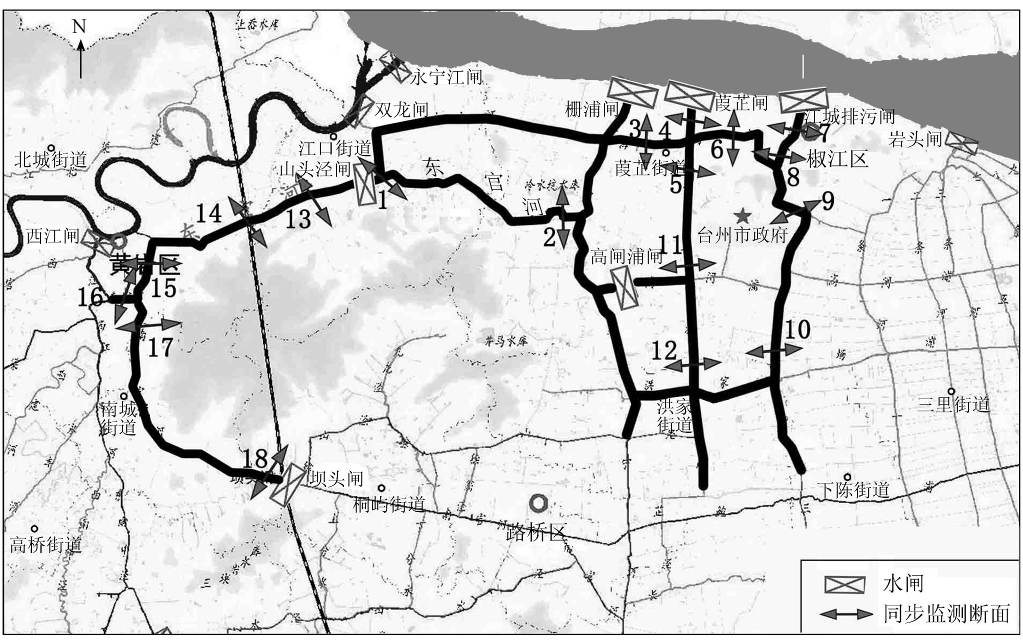


图 1　研究区域水系分布情况、闸坝位置和同步监测断面位置分布

程是在质量守恒和动量守恒基础上，运用描述河流水流运动的圣维南方程组，并在此基础上增加考虑了漫滩和旁侧入流。

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+B_{\mathrm{w}}\frac{\partial z}{\partial t}=q \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\alpha Q^2}{A}\right)+gA\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{gQ|Q|}{C^2AR}=0 \tag{2}$$

式中：Q 为流量，$\mathrm{m^3/s}$；B_{w} 为调蓄宽度，指包括滩地在内的全部河宽，m；z 为水位，m；x 为沿水流方向的空间坐标，m，；t 为时间坐标，s；q 为旁侧入流单宽流量，入流为正，出流为负，$\mathrm{m^2/s}$；α 为动力系数，一般取 1；A 为主槽过水断面面积，$\mathrm{m^2}$；g 为重力加速度，$\mathrm{m/s^2}$；C 为谢才系数；R 为水力半径，m。

方程组求解方法采用 Abboptt-lonescu 六点隐式有限差法，该方法具有稳定性好、计算精度高的特点，离散后的线性方程组用追赶法求解[14]。

b. 水质模型基本方程。污染物在水中的分布与浓度主要取决于自身的降解、随水流的运动以及污染物的扩散。水质模型采用一维河流水质对流扩散方程：

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t}+\frac{\partial Q\rho}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial x}\left(AD\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)=-AK\rho+\rho_2 q \tag{3}$$

式中：ρ 为污染物质量浓度，mg/L；D 为纵向扩散系数，m/s；K 为线性衰减系数，1/d；ρ_2 为源汇项质量浓度，mg/L。

2.2.2 河网概化及边界选取

将东官河所在区域内局部河网进行概化，主要河道包括南官河、东官河、永宁河、海门河等，共设置 8 个边界条件，其中 4、7、10、12、16、18 这 6 个边界为开边界，模型计算时采用水文同步监测数据作为边界条件；0、1 号边界由于闸门是封闭的，故将其设为闭边界。水质条件则采用调水期间邻近的例行监测断面监测数据。具体概化情况见图 2。河道的断面形状采用同步监测时测量的大断面数据。

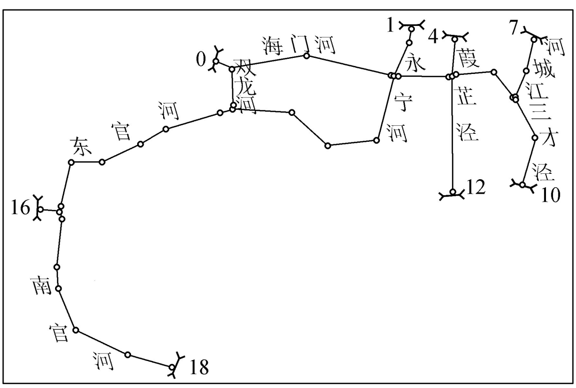


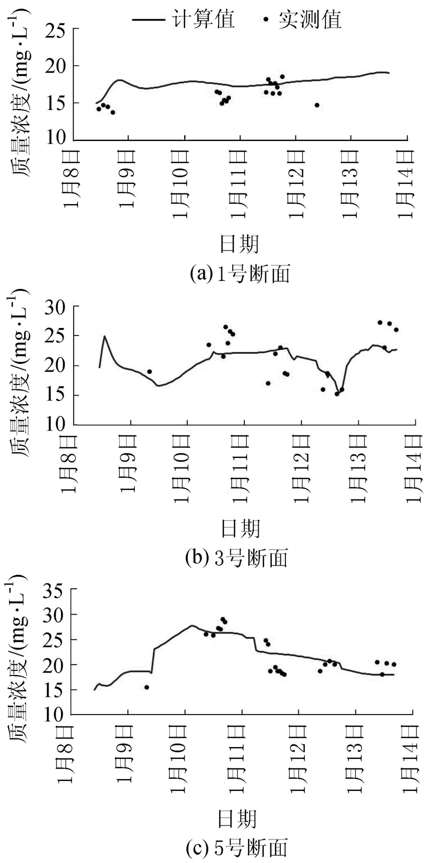
图 2　研究区域河网概化及边界信息

2.2.3 参数率定

利用 2012 年 1 月 8—13 日水量水质同步监测数据对河道糙率和各项水质降解参数进行率定，确定所构建的模型对研究区域内水环境数学模拟的适宜性。

a. 水动力参数率定[15]。利用研究区域内 2、3、6、9 号断面流量计算值与实测值进行对比，率定得到河道糙率为 0.03。计算结果显示 2、3、6、9 号断面流量计算值与实测值相对误差依次为 0.7%、1.57%、9.83%、3.28%，说明模型适宜于该地区水动力模拟。

b. 水质参数率定。利用研究区域内 1、2、3、5、6、8 号断面水质计算值与实测值进行对比，率定得到研究区域内 COD 的降解系数为 0.1 ~ 0.12$\mathrm{d^{-1}}$，NH_3-N 的降解系数为 0.08 ~ 0.1$\mathrm{d^{-1}}$。计算结果显示 COD 的相对误差均小于 11.36%，平均误差为 9.43%；NH_3-N 的相对误差均小于 12.13%，平均误差为 8.62%，计算结果与实测结果吻合较好，说明模型参数适用于该地区水质模拟。部分断面计算值与实测值对比结果见图 3 和图 4。



(a) 1号断面

(b) 3号断面

(c) 5号断面

图 3　不同日期零点时 1、3、5 号断面 ρ(COD) 计算值与实测值对比

3 基于控制断面水质改善的总量控制方案

3.1 方案制定

针对东官河所处的地理位置以及其水质特性，并结合《台州市水环境专项治理规划》和《东官河综

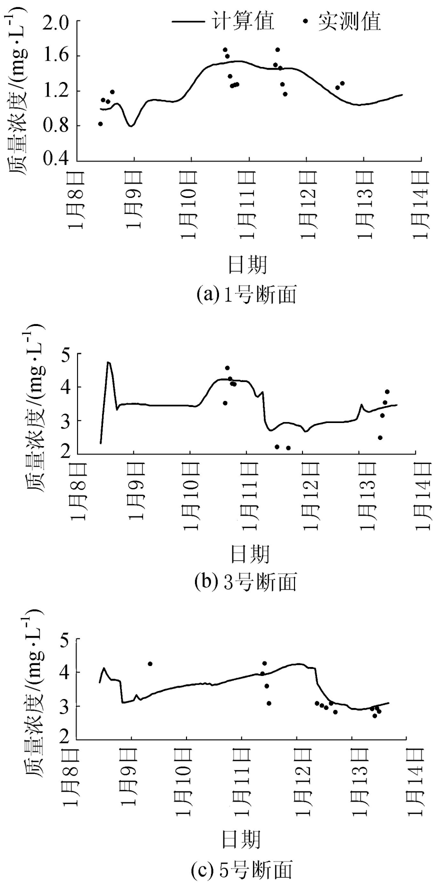


图4　不同日期零点时1、3、5号断面 $\rho(NH_3\text{-}N)$ 计算值与实测值对比

合整治方案》等提出的治理措施,考虑东官河污染削减情况与区域外引调水,并同时结合75%和90%水文保证率条件下的设计水量和近远期治理目标,本文设计了9种计算方案,采用已建立的水环境数学模型对东官河各控制断面水质进行预测。具体计算方案详见表1。

表1　东官河水环境控制计算方案

期限	断面编号	设计水文条件	污染物削减情况
近期	1	90%保证率	不削减
	2		削减60%
	3	90%保证率,控制长潭水库入东官河生态补水量2000万 m^3	削减60%
	4	75%保证率	不削减
	5		削减60%
	6	75%保证率,控制长潭水库入东官河生态补水量2000万 m^3	削减60%
中远期	7	75%保证率	削减75%
	8		削减90%
	9	75%保证率,控制长潭水库入东官河生态补水量2000万 m^3	削减75%

表1中长潭水库补水量的确定是根据长潭水库补给温黄平原的生态环境水量足以将河网正常蓄水位与最低控制水位间的水体置换约1~2次来计算,约需要2000万~3000万 m^3/a 的水量,本文计算时取较不利情况补水量2000万 m^3/a。

3.2　计算结果

利用已建立的东官河水环境数学模型,模拟9种计算方案对东官河沿线各断面各项水质的改善情况。选取处于椒江区和黄岩区交界的1号断面、处于椒江区中心的3号断面和处于椒江区下游入椒江口的4号断面作为控制断面,这3个断面在9个方案条件下的 ρ(COD)和 $\rho(NH_3\text{-}N)$ 预测结果见图5和图6。

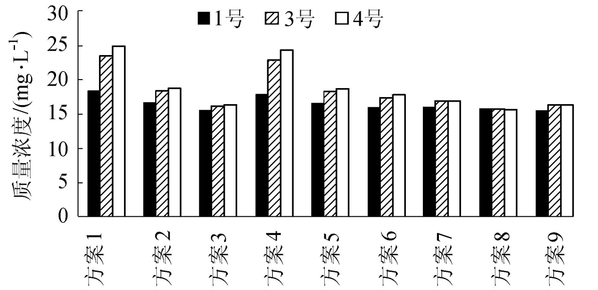


图5　9种计算方案下COD质量浓度预测结果对比

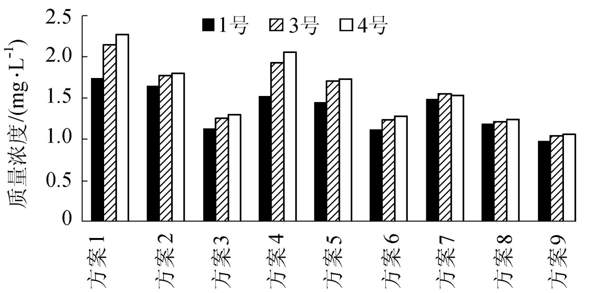


图6　9种计算方案下 $NH_3\text{-}N$ 质量浓度预测结果对比

3.2.1　近期方案计算结果及分析

方案1~3是在枯水年(90%水文保证率年份)条件下进行计算分析。方案1维持现状污染物排放情况下,3个断面COD的质量浓度基本在30 mg/L以内,但是 $NH_3\text{-}N$ 质量浓度较高,各断面水质在Ⅴ类及劣Ⅴ类水平,沿程水质不断恶化;方案2对区域污染物削减率达到60%,模拟结果表明各项指标质量浓度值均有一定程度的下降,各断面水质基本可达Ⅴ类,且沿程水质恶化程度有所缓解;方案3在污染物削减60%的基础上,控制长潭水库枯水期生态补水量2000万 m^3 清水,计算结果表明,东官河水质进一步好转,各断面水质基本可达Ⅳ类。

方案4~6是在正常年份(75%水文保证率年份)条件下进行计算分析。在方案4正常年份且维持现状污染物排放情况下,各断面水质在Ⅴ类及劣Ⅴ类水平,且沿程水质不断恶化;方案5对区域污染物削减率为60%的情况下,各项指标质量浓度值均有一定程度的下降,东官河至市区的交接断面水质可达Ⅳ类,但是部分沿程断面水质仍为Ⅴ类;方案6

在污染物削减60%的基础上，控制长潭水库枯水期生态补水量2 000万m^3清水，计算结果表明东官河水体污染物质量浓度持续下降，各断面水质均可达Ⅳ类水平。

3.2.2 中远期方案计算结果及分析

考虑近期方案两种水文保证率下的计算结果，各断面的平均水质差别不大，只是随降雨和流量的变化，质量浓度曲线的变化情况有较大的出入，且75%水文保证率更符合实际情况，中远期污染控制措施制定时只考虑了75%水文保证率的计算工况。

方案7考虑区域污染物削减75%的情况下，东官河上各断面水质在Ⅳ类水平左右，但距离达到水功能区的要求还有一定的差距，主要污染指标为NH_3-N；方案8对区域污染物进一步进行削减，削减率达到90%时，模拟结果表明东官河沿线断面水质进一步提升，水质接近Ⅲ类水平；方案9在污染物削减75%的基础上，控制长潭水库枯水期生态补水量2 000万m^3清水，计算结果表明东官河水体污染物质量浓度进一步下降，进入市区断面（1号）时水质基本可达Ⅲ类水平，市区沿线断面（3号、4号）水质接近Ⅲ类水平。

3.2.3 推荐方案的水质可达性分析

满足近期区域水环境质量改善要求，不论在枯水年份还是正常降水年份，现状区域内污染物削减率达60%，东官河与市区的交界断面水质可达Ⅳ类水平，控制长潭水库生态引水量为2 000万m^3，东官河整条河的水质均可达Ⅳ类要求。综合考虑技术经济的可实现性，推荐近期可先采用方案6来实现东官河水质的改善。

满足中远期区域水环境质量改善要求，可通过进一步加快污染处理设施的建设速度，提高实施效率，在区域内污染物削减率达90%时，东官河水质可稳定达到Ⅳ类水接近Ⅲ类水的要求；在区域污染物削减率达75%并配合长潭水库引调水，东官河各断面水质平均值均优于方案8的计算结果，水质更加接近Ⅲ类目标，但是，由于调水期和非调水期水质的跳跃较大，因而综合考虑之后推荐方案8作为远期的控制方案。

4 结 论

a. 利用MIKE11构建东官河河网水环境数学模型，基于水量、水质同步实测数据对模型进行率定验证，得到研究区域内河道糙率为0.03，COD降解系数为$0.1\sim0.12d^{-1}$，NH_3-N的降解系数为$0.08\sim0.1d^{-1}$，率定结果表明模型计算值与实测值能较好吻合，可用于模拟东官河河网水量水质变化过程。

b. 利用构建的东官河水环境数学模型，考虑水文条件、污染物削减和引水3个方面因素，提出了9套计算方案对东官河控制断面水质进行预测。结果表明，枯水年份和正常年份2种水文保证率下各断面平均水质差别不大，只是受降雨和流量的变化，水质浓度曲线变化趋势不同；近期区域内仅单纯依靠污染物削减率不能完全解决东官河水质改善要求，需同时配合长潭水库调水，当区域内污染物削减60%且长潭水库调水量为2 000万m^3时，东官河控制断面水质可达Ⅳ类；远期区域内污染物削减率达90%时，东官河水质基本可达Ⅲ类即功能区水质目标。

c. 平原河网地区城市内河河流污染物排放量较大，当污染物削减情况不能满足水体净化能力时，通过合理控制河网内的闸坝，调取优质水源进入河网中，可以在短时间内增强水体的流动性，有效对河水进行稀释，降低河道内各类污染物的浓度，具有立竿见影的效果。当污染物削减量进一步增加时，单纯通过污染物削减措施即可满足水环境的改善目标，因此开展东官河水环境整治，主要是对东官河周边各项污染物开展截污工程和削减措施，减少污染物入河量，使东官河水质得到根本治理。

参考文献：

[1] STREETER H W, PHELPS E B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River: Ⅲ. Factors concerned in the phenomena of oxidation and reaeration [M]. Washington D. C: US Government Printing Office, 1925:1-10.

[2] LOUCKS D P, LYNN W R. Probabilistic models for predicting stream quality[J]. Water Resources Research, 1966, 2(3):593-605.

[3] LEWIS D R, WILLIAMS R J, WHITEHEAD P G. Quality simulation along rivers (QUSAR): an application to the Yorkshire Ouse [J]. Science of the Total Environment, 1997, 194:399-418.

[4] LEES M J, CAMACHO L, WHITEJEAD P. Extension of the QUASAR river water quality model to incorporate dead-zone mixing [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussion, 1998, 2(2):353-365.

[5] 许婷. 丹麦MIKE21模型概述及应用实例[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(8):867-869. (XU Ting. Calculation principle and application example of a two-dimensional flow Model-MIKE21 HD[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010, 16(8):867-869. (in Chinese))

[6] 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 comprehensive river water quality model QUAL2K[J]. Journal of China Institute Water Resources and Hydropower Research, 2010,8(1): 71-75. (in Chinese))
[7] 钱海平,张海平,于敏,等.平原感潮河网水环境模型研究[J].中国给水排水,2013,29(3):61-65.(QIAN Haiping, ZHANG Haiping, YU Min, et al. Water environment model for plain tidal river network[J]. China Water and Wastewater, 2013, 29(3): 61-65. (in Chinese))
[8] 黄琳煜,聂秋月,周全,等.基于MIKE11的白莲泾区域水量水质模型研究[J].水电能源科学,2011,29(8): 21-24.(HUANG Lingyu, NIE Qingyue, ZHOU Quan, et al. Study of water quantity and water quality model of bailianjing region based on MIKE11[J]. Water Resources and Power,2011,29(8):21-24.(in Chinese))
[9] 朱茂森.基于MIKE11的辽河流域一维水质模型[J].水资源保护,2013,29(3):6-9.(ZHU Maosen. One-dimensional water model based on MIKE11 for Liaohe Basin[J]. Water Resources Protection,2013,29(3):6-9.(in Chinese))
[10] 付浩,孙瀚,逄勇.基于重污染区入湖断面水质(总氮)达标的污染控制方案[J].水资源保护,2014,30(4): 36-42,52.(FU Hao, SUN Han, PANG Yong. A pollution control scheme based on discharge of sections with standard-reaching water quality(TN) into Taihu Lake in heavily polluted lake area[J]. Water Resources Protection,2014,30(4):36-42,52.(in Chinese))
[11] 孙卫红,王金龙.通吕运河控制断面水质达标分析[J].环境科学与管理,2010(10):39-42.(SUN Weihong, WANG Jinlong. Tonglyu canal water quality control section analysis[J]. Environmental Science and Management,2010(10):39-42.(in Chinese))
[12] 卢士强,徐祖信,罗海林,等.上海市主要河流调水方案的水质影响分析[J].河海大学学报(自然科学版),2006(1):32-36.(LU Shiqiang, XU Zuxin, LUO Hailin, et al. Influence of water diversion schemes on water quality of Shanghai river networks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2006(1):32-36.(in Chinese))
[13] 王雪,逄勇,谢蓉蓉,等.基于控制断面水质达标的秃尾河流域总量控制[J].北京工业大学学报,2015(1): 123-130.(WANG Xue, PANG Yong, XIE Rongrong, et al. Total amount control of water quality standard at the control section in Tuwei River Basin[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015(1):123-130.(in Chinese))
[14] 杜娟.MIKE11在引清调水效果分析中应用[J].东北水利水电,2014(7):4-5,71.(DU Juan. Application of MIKE11 in effectiveness analysis of clean water diversion[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2014(7):4-5,71.(in Chinese))
[15] 胡琦玉,逄勇,鲁祖宝.平原河网水体石油类浓度达标及总量控制[J].水资源保护,2014,30(1):57-63.(HU Qiyu, PANG Yong, LU Zubao. Standard-reaching analysis of petroleum pollutant concentrations and total quantity control in plain river network[J]. Water Resources Protection,2014,30(1):57-63.(in Chinese))

(收稿日期:2016-01-05　编辑:彭桃英)

·信息播报·

夏军院士学术报告会在河海大学举行

2016年1月17日上午9:00–11:00,中国科学院夏军院士在河海大学闻天馆一楼113报告厅做了题为“水科学前沿问题及非线性水系统方法与实践“的学术报告。此次学术报告会由水文水资源与水利工程学科国家重点实验室与河海大学水文水资源学院主办。河海大学水文水资源学院院长余钟波、副院长杨涛以及来自各学院的教师和学生参加了此次报告会。

报告会由余钟波院长主持。余院长首先简单介绍了夏军院士。夏军院士现任武汉大学教授,博士生导师,主要从事水文水资源研究,已发表SCI论文134篇,IE收录论文157篇,出版专著10部,曾获国际水文科学领域最高奖”国际水文科学奖”等。

夏军院士从全球水安全问题、水科学前沿问题和水文系统方法与实践3方面展开叙述,概述了水安全方面全球关注的重点和中国面临的问题和挑战;强调社会科学和自然科学的深度交叉,介绍了变化环境下的水问题与科学体系,从水与气候、环境、生态、社会4个角度指出了当前热点和发展方向;在高度肯定前人贡献后,结合夏军院士自己的经验和研究成果,详述了水文非线性系统识别理论与方法、径流形成与转化的时变增益机理和分布式时变增益水文水资源模型。

报告结束后,师生们进行了现场提问,夏军院士一一做了详细解答,并希望以后河海大学与武汉大学师生加强交流和学术探讨。此次交流报告会开拓了师生的学术国际视野,获得圆满成功。

(河海大学水文水资源学院　向　龙　供稿)