

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.005

太湖流域跨界区域水污染物通量数值模型构建与应用

庄巍¹, 王晓^{2,3}, 逢勇^{2,3}, 李维新¹

(1. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
3. 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:以太湖全流域河网模型为基础,构建跨界区域套网格水环境数学模型,并利用31个苏浙沪跨界断面实测资料进行率定。提出跨界区域水污染物通量值、通量阈值以及超标通量值的计算方法,采用实时校核及区域叠加技术,形成苏浙沪跨界区域水污染物通量数值计算体系。在集成开发的跨界区域污染物通量监控系统中,初步开展了跨界通量计算的业务化应用。

关键词:太湖流域; 污染物通量; 水环境数学模型; 河网; 系统集成

中图分类号: X830.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)01-0036-06

Establishment and application of numerical model of water pollutants flux for trans-boundary regions of Taihu Lake Basin

ZHUANG Wei¹, WANG Xiao^{2,3}, PANG Yong^{2,3}, LI Weixin¹

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on a whole river network model of Taihu Lake Basin, a nested local mathematical model of water environment was established, calibrated by data from the 31 existed monitoring sites in trans-boundary regions of Jiangsu, Zhejiang and Shanghai. Flux of pollutants, flux threshold and excessive flux value methods for calculating water pollutants in trans-boundary regions were proposed, combined with real-time verification and the domain superposition technique. Subsequently, a water pollutants flux monitoring system for trans-boundary regions of Jiangsu, Zhejiang and Shanghai was developed, in which the primarily operational application was carried out.

Key words: Taihu Lake Basin; flux of pollutants; mathematical model of water environment; river network; system integration

太湖流域苏浙沪跨界区域是典型的平原感潮河网地区,河网湖荡密布,水流往复不定,水文水质形势复杂多变,跨省各行政区污染责任界定不清,污染事故和水质考核矛盾突出,单一的水质浓度指标难以完全反映区域水质问题、界定上下游的相互影响。因此,有必要开展跨界区域水污染通量方面的研究^[1-2]。

近年来,太湖流域有关水污染物通量的报道多集中于通过水文基站观测或水文巡测获取流量,并结合同期水质监测数据来进行整编测算分析^[3-7]。这极大地依赖于同步监测点位布设情况,且多以入湖河流与湖体间的污染物通量为讨论主体。由于感潮河网区流向顺逆不定,如果直接利用已有常规监

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-007, 2014ZX07101-011); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2015-33); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ14G030020)
作者简介: 庄巍(1981—),男,助理研究员,博士,主要从事水环境资源保护方面研究。E-mail: zhuangwei@nies.org
通信作者: 李维新, 研究员。E-mail: lwx@nies.org

测站点数据进行通量测算,则监测点位分布、监测频次方面难以满足要求;而开展河网区野外同期水量水质实测,则需要消耗大量的人力物力,难以持续开展。以上限制因素导致目前对于感潮河网污染物通量方面的研究较少。通过构建水环境数学模型,开展复杂水系河湖之间、河道之间的水污染物通量研究^[2,8]。通过模型运算获得跨界区域污染物过境通量数据,有利于整合优化有限的监测站位,对于河网区域具有应用价值。

此外,GIS 技术近年来在水环境管理领域获得长足发展,结合水环境数值模型,通过 GIS 手段进行直观可视化表达,提供友好的用户交互环境,有助于提高工作效率,在环境管理工作中具有现实意义^[9-10]。建立流域层面的跨行政区的水环境监控及通量测算系统,为跨界矛盾提供协商交流平台,是各级环保管理部门的迫切需求。

笔者针对太湖跨界河网区的环境特征,构建跨界区域套网格水环境数学模型,提出跨界区域通量计算、阈值确定和超标通量计算方法,建立实时校核及区域叠加的太湖流域跨界区域主要水污染物通量计算模式,并利用集成开发的水污染物通量监控系统实现初步业务化应用。

1 研究区域概况

太湖流域跨界区域为苏浙沪两省一市交界,包括位于苏沪长江交界点至汾湖大桥的苏沪线,长约 114 km;汾湖大桥至金山区的沪浙线,长约 82 km;汾湖大桥至吴淞太湖点的苏浙线,长约 109km。研究区域内地势低平,属于典型的平原河网区。

在苏浙沪边界上共设置了 31 个河流国控省级跨界断面,位置分布见图 1。受潮汐作用影响,太湖流域跨界区域内水流方向复杂多变,水质变化规律复杂。根据水利部太湖流域管理局发布的 2009 年 3 月—2012 年 12 月的《太湖流域及东南诸河省界水体水资源状况通报》,按照跨界断面所处省界区域进行流向的累计统计,统计结果(表 1)表明该区域内水流具有明显的往复流特征。

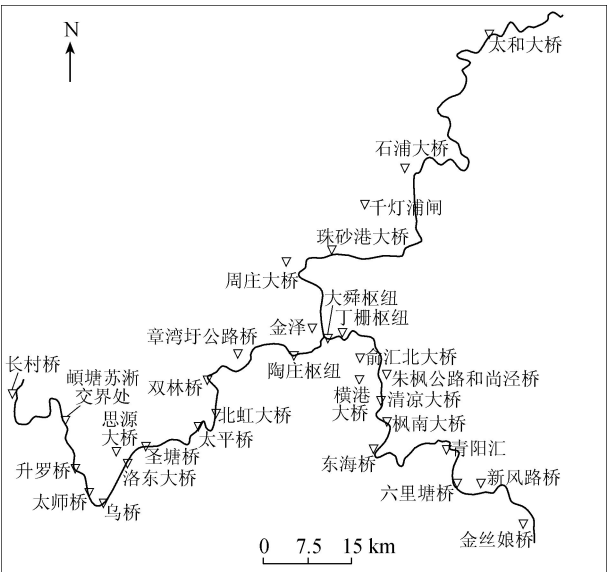


图 1 太湖流域苏浙沪跨界交界线及跨界断面位置分布

2 跨界区域套网格水环境数学模型构建及通量计算方法

2.1 跨界区域水环境数学模型构建

为提高跨界控制区域通量计算精度,以文献[10-11]构建的太湖全流域河网模型为基础,对跨界区域范围进行局部加密,构建跨界区域套网格水环境数学模型。根据跨界水环境控制区划分成果^[12],确定了包含太仓市、昆山市、吴江区、嘉定区、青浦区、金山区、松江区、湖州市南浔区、桐乡市、嘉善县、嘉兴市区、平湖市等区域的套网格水环境模型模拟范围。跨界水环境套网格数学域模型共设置河道 190 条,河道断面间距(计算水位点)300~1 000 m,模型计算网格(计算水位点、流量点)总数约为 639 个。太湖流域跨界区域套网格河网概化情况见图 2。

2.2 跨界区域水环境数学模型率定

跨界套网格水环境数学模型设置 46 个开边界,按照上游流量、下游水位的原则分别设置 8 个流量边界,38 个水位边界。模型边界采用跨界控制区内 56 水文水位站点逐日监测及 48 个水质站点逐月监测资料;部分没有实测资料的,由太湖水环境数学模型计算值提供。

表 1 太湖流域苏浙沪跨界区域累计流向统计结果

省界	断面名称	累计流向比例/%			备 注
		正向	逆向	滞流	
苏沪	太和大桥、石浦大桥、珠砂港大桥、周庄大桥、千灯浦闸	77.3	7.4	15.3	以往上海方向为正向
苏浙	陶庄枢纽、章湾圩公路桥、长村桥、升罗桥、思源大桥、頔塘苏浙交界处、北虹大桥、太平桥、双林桥、圣塘桥、洛东大桥、乌桥、太师桥	46.9	40.9	12.2	以往浙江方向为正向
浙沪	丁栅枢纽、横港大桥、大舜枢纽、枫南大桥、清凉大桥、东海桥、金丝娘桥、新风路桥、六里塘桥、青阳汇桥、俞汇北大桥、朱枫公路和尚泾桥	83.9	10.7	5.4	以往上海方向为正向
苏浙沪	金泽	90.5	9.5	0	以往上海方向为正向

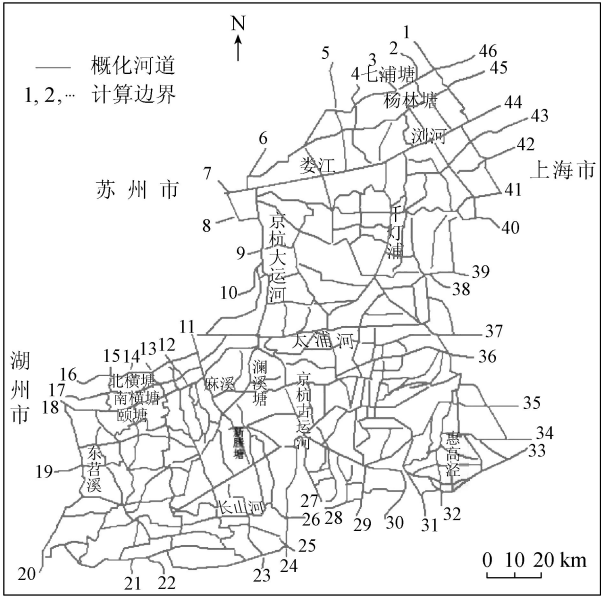


图2 套网格水环境模型河网示意图

2.2.2.1 水动力参数率定

利用太湖跨界控制区内水文水位站的 2011 年实测数据对模型动力参数进行率定。考虑跨界控制区各个水环境管理区内水系河道的水文水系特征不同,故以各控制区为单位分区进行模型水动力参数率定,率定结果见表 2。

表2 跨界套网格水环境数学模型水动力参数率定结果

区域名称	水环境控制区					
	苏沪	苏浙沪	浙苏	浙苏沪	沪浙	沪苏浙
糙率	0.020 ~ 0.026	0.020 ~ 0.028	0.020 ~ 0.027	0.020 ~ 0.026	0.022 ~ 0.027	0.022 ~ 0.028

利用 2011 年跨界断面实测资料与模型计算结果进行对比分析,结果表明,水文水动力模型水位模拟结果与实测结果吻合较好,2011 年最高及最低日均水位、水位过程线趋势与实测资料拟合情况较好,全年期水位模拟结果与实测结果的平均误差小于 15 cm。部分跨界断面水位率定对比见图 3。

2.2.2.2 水质参数率定

利用跨界区域 2011 年水质监测数据对模型水质参数进行率定。由于不同的区域水系河道具有不同的水动力特征,而水动力条件对污染物的迁移和转化会产生一定的影响,因此结合跨界控制区各个子控制区的水文水系及污染分布特征,以各子控制区为单位分区率定得到模型水质参数,参数结果见表 3。

表3 跨界套网格水环境数学模型水质参数率定结果

编号	区域名称	K_{COD}	$K_{\text{NH}_3\text{-N}}$	K_{TP}
1	苏沪水环境控制区	0.11 ~ 0.13	0.04 ~ 0.07	0.045
2	苏浙沪水环境控制区	0.10 ~ 0.13	0.04 ~ 0.07	0.045
3	浙苏水环境控制区	0.1 ~ 0.13	0.05 ~ 0.07	0.045
4	浙苏沪水环境控制区	0.09 ~ 0.13	0.05 ~ 0.07	0.045
5	沪浙水环境控制区	0.11 ~ 0.16	0.04 ~ 0.07	0.045
6	沪苏浙水环境控制区	0.10 ~ 0.15	0.04 ~ 0.07	0.045

本次河网水质模型率定参数选取 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 3 种污染物指标,利用 2011 年跨界控制区内的水质监测数据与模型计算结果进行对比,得到 31 个跨界断面水质计算值和实测值的相对误差。结果表明,2011 年跨界区域内断面水质模拟吻合度较好,平均相对误差在 25% 以内。部分跨界断面水质率定对比见图 4。

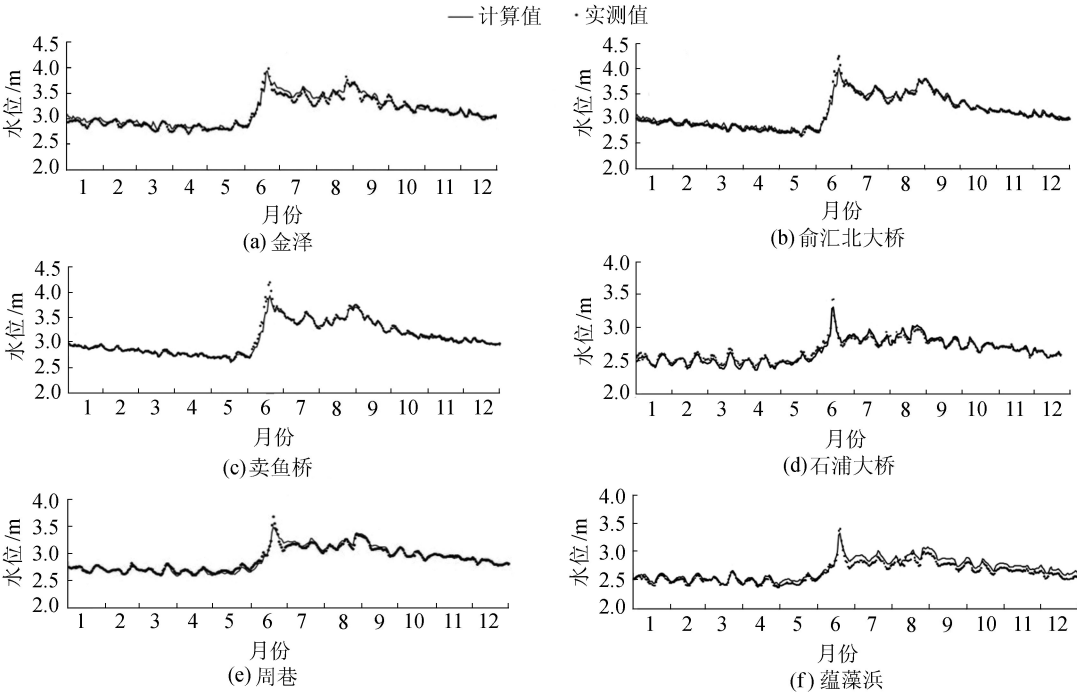


图3 2011 年主要跨界断面水位计算值与实测值对比

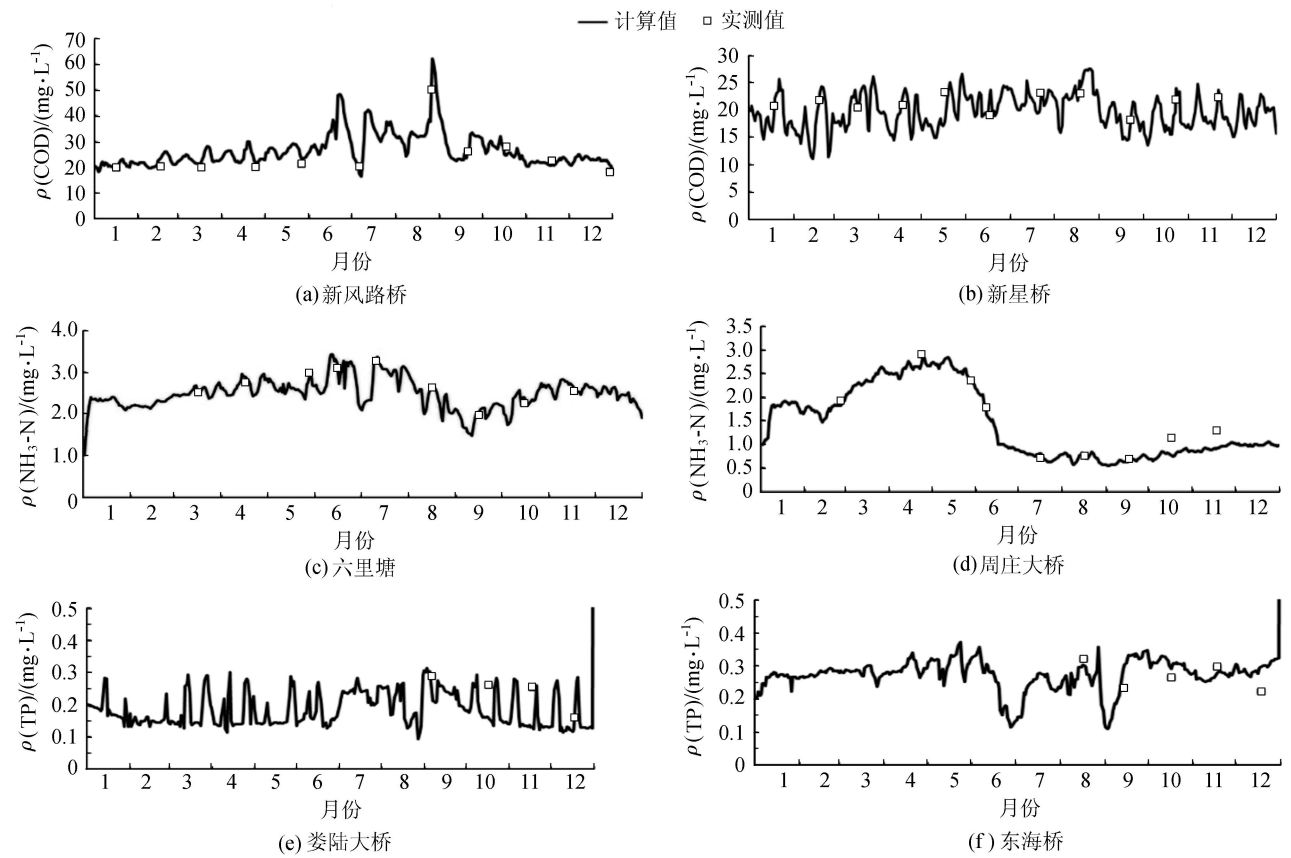


图4 2011年部分跨界断面污染物质量浓度计算值与实测值对比

2.3 跨界区域水污染物通量计算模型

2.3.1 跨界区域通量计算方法

跨界区域污染通量计算公式为

$$W = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \rho_{ij} Q_{ij} \alpha_i \quad (1)$$

式中: W 为跨界区域出入境污染物通量; i 为计算天数; j 为计算区域内河道数量; ρ_{ij} 为跨界区域内各河道跨界断面水质质量浓度; Q_{ij} 为跨界区域内各河道跨界断面流量; α_i 为该区域通量校核系数。

基于区域污染物通量计算公式(1), 利用太湖流域水环境数学模型及已建立的31个苏浙沪跨界污染物通量监测站点的实测资料, 建立苏浙沪跨界区域各行政区间污染物通量计算体系。该体系采用实时校核及区域叠加技术, 即用区域内部分断面实测通量指标与模型计算结果进行实时订正, 所得订正系数用以校核区域内其他河道通量计算结果, 并将区域内所有河道实时计算通量值叠加, 以期计算一定时间内区域内污染物通量值。

2.3.2 跨界区域通量阈值计算方法

在区域通量计算公式的基础上, 根据太湖流域90%设计水文年的年均流量值与水功能区划的水质目标值, 计算得到各个河段的通量阈值。跨界区域污染通量阈值计算公式为

$$W_s = \sum_{j=1}^m \rho_s Q_j \quad (2)$$

式中: W_s 为跨界区域出入境污染物通量阈值; j 为区域内河道数量; ρ_s 为计算区域内各个河段的水功能区划水质目标值; Q_j 为跨界区域各河道90%设计水文年平均流量。

a. 确定设计水文年。 主要依据太湖流域的降水量资料选取典型年。考虑太湖流域各水文分区的雨量站的分布, 采用丹阳、茅东、赵村、溧阳、宜兴、常州、陈墅等80多个雨量站1954—2012年共58年的年降水量资料进行频率分析, 最终确定1971年的枯水保证率为90%。

b. 确定水质目标。 根据国务院2010年批复的《太湖流域水功能区划》, 跨界控制区内水功能区划共151处, 其中江苏省水功能区划25处, 浙江省55处, 上海市28处, 省界水功能区划43处。根据各水功能区对应水质指标进行水质目标确定。

2.3.3 跨界区域超标通量计算方法

跨界区域污染超标通量计算公式为

$$W_c = W - W_s \quad (3)$$

式中: W 为跨界区域出入境污染物通量; W_c 为跨界区域出入境污染物超标通量。

3 跨界区域水污染物通量监控系统构建与应用

3.1 跨界区域通量监控系统构建

通过 Web-GIS 等开发手段进行系统集成耦合,将跨界通量测算体系中的相关水环境信息及数值模型等嵌入 GIS 管理平台,研发具备水质在线监测及数据分析、水环境数学模型构建及计算分析、水污染物通量动态测算等功能的跨界区域水污染物通量监控系统,其系统集成结构如图 5 所示。

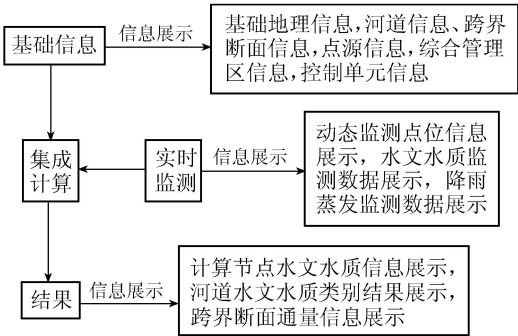


图 5 系统集成总体结构示意图

该系统将水环境信息与空间信息紧密结合,可直观形象地展示模型河道及关键断面水质计算结果信息;基于前述通量核算体系,可实现苏浙沪跨界区域各行政区间水污染物通量的动态计算,以及跨界区域通量超标预警(图 6)。

3.2 跨界区域通量计算及分析

3.2.1 跨界区域水污染物通量计算

对跨界控制区涉及的江苏省苏州市、浙江省湖

州市、浙江省嘉兴市及上海市内 14 个县(区)进行分析,确定了 10 个水污染物出(入)省界交换县区,基于苏浙沪跨界区域各行政区间的水污染物通量计算体系,利用通量计算公式(1),采用 2009—2012 年跨界区域水文、水质实测资料,计算得到了苏浙沪跨界区域各行政区间的逐月水污染物通量值。其中 2011 年跨界区域水污染物通量计算结果见表 4。

表 4 2011 年各县区跨界水污染物通量计算结果 t/a

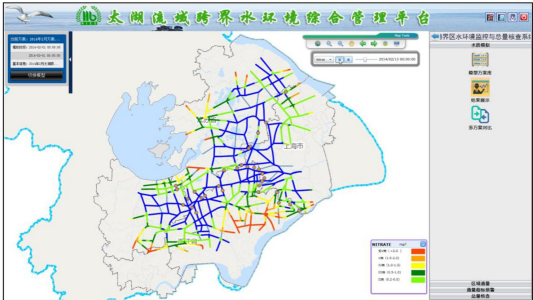
省界	交界行政区 (区、县)	跨界水污染物通量		
		COD	NH ₃ -N	TP
江苏—上海	太仓—嘉定	13 215	965	82
	昆山—青浦	77 100	9 087	1 177
	吴江—青浦	60 902	2 218	419
江苏—浙江	吴江—嘉善	5 920	173	20
	吴江—嘉兴	9 300	446	455
	吴江—桐乡	8 910	761	239
	吴江—南浔	25 760	868	347
浙江—上海	嘉善—青浦	78 950	3 324	850
	嘉善—金山	21 862	4 443	414
	平湖—金山	26 720	5 430	506

3.2.2 跨界区域通量阈值计算

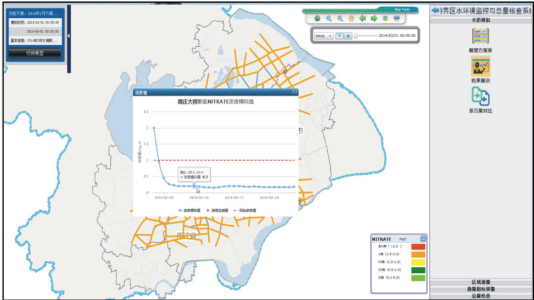
根据 90% 枯水保证率水文条件及水功能区划水质目标,利用跨界区域水污染通量阈值计算公式(2),计算得到了苏浙沪跨界区域各行政区间跨界污染物通量阈值,见表 5。

3.2.3 跨界区域超标通量计算

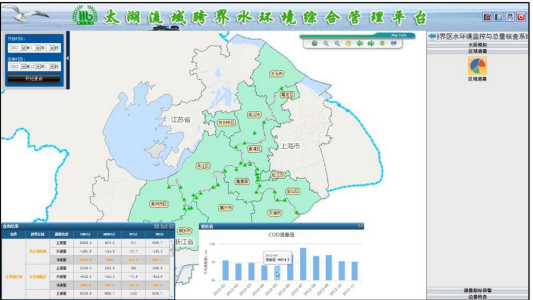
基于苏浙沪跨界区域各行政区间的水污染物通量计算结果与通量阈值,利用跨界区域水污染超标通量计算公式(3),计算得到了苏浙沪跨界区域各



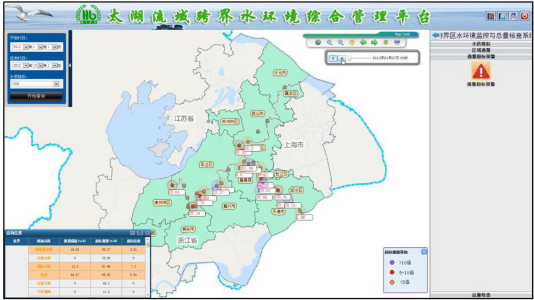
(a) 跨界河网区水质浓度计算结果显示界面



(b) 河道断面浓度计算值显示界面



(c) 跨界区域通量查询界面显示图



(d) 跨界区域通量超标界面显示图

图 6 跨界区域水污染物通量监控系统部分功能截屏

表 5 各县区主要河道跨界水污染物通量阈值计算结果

t/a

省界	交界行政区 (区、县)	跨界水污染物通量阈值		
		COD	NH ₃ -N	TP
江苏—上海	太仓—嘉定	5 899	1 042	98
	昆山—青浦	39 807	9 087	1 177
	吴江—青浦	60 902	0	419
江苏—浙江	吴江—嘉善	3 469	0	20
	吴江—嘉兴	11 940	693	455
	吴江—桐乡	8 911	0	242
	吴江—南浔	25 760	0	347
浙江—上海	嘉善—青浦	78 950	3 324	850
	嘉善—金山	0	5 872	519
	平湖—金山	0	3 961	405

行政区间 2009—2012 年的逐月水污染物超标通量值,其中 2011 年超标通量计算结果见表 6。由表 6 可知,2011 年内,跨界区交界行政区间,江苏—上海交界处的 COD 超标通量最高,而浙江—上海交界处 NH₃-N 及 TP 的超标通量最高。

表 6 2011 年各县区跨界水污染物超标通量计算结果

t/a

省界	交界行政区 (区、县)	跨界水污染物超标通量		
		COD	NH ₃ -N	TP
江苏—上海	太仓—嘉定	5 899	1 042	98
	昆山—青浦	39 807	9 087	1 177
	吴江—青浦	60 902	0	419
江苏—浙江	吴江—嘉善	3 469	0	20
	吴江—嘉兴	11 940	693	455
	吴江—桐乡	8 911	0	242
	吴江—南浔	25 760	0	347
浙江—上海	嘉善—青浦	78 950	3 324	850
	嘉善—金山	0	5 872	519
	平湖—金山	0	3 961	405

4 结 语

在太湖流域大网模型基础上,构建了苏浙沪跨界区域河网加密的套网格水环境数学模型,利用水文、水质同步监测数据率定得到各项模型参数。利用污染物通量计算原理,建立了跨界区域污染物通量计算模型,并结合太湖流域已建立的 31 个苏浙沪跨界污染物监测站点的实测数据,采用实时校核及区域叠加技术,构建了苏浙沪跨界区域各行政区间的污染物通量计算体系。

利用 2009—2012 年跨界区域水文、水质实测资料,计算得到了苏浙沪跨界区域各行政区间的污染物通量。其中,2011 年的跨界区水污染物超标通量计算值表明,跨界区域交界行政区间,江苏—上海交界处 COD 超标通量最高,浙江—上海交界处 NH₃-N 及 TP 的超标通量最高。计算结果可为跨界矛盾调处、责任认定、生态补偿等环境管理提供科学量化依据。

采用二次开发系统耦合技术,研发了跨界区域水污染物通量监控系统,并开展了初步业务运行。该系统可在太湖跨界区域污染责任认定、跨省界矛盾协调等环境管理工作中发挥重要作用,具有一定的经济、社会和环境效益,具有良好的应用及发展前景。

参考文献:

[1] 王健健,逢勇,朱心悦,等. 基于多目标的小流域污染控制方案及效果;以苏州胥江小流域为例[J]. 水资源保护,2009,29(4):56-67. (WANG Jianjian, PANG Yong, ZHU Xinyue, et al. Multi-objective based pollution control plan for small basins and effect assessment; a case study of Xujiang small basin in Suzhou City [J]. Water Resources Protection, 2009, 29(4): 56-67. (in Chinese))

[2] 陈亚男,逢勇,赵伟,等. 望虞河西岸主要入河支流污染物通量研究[J]. 水资源保护,2011,27(2):26-33. (CHEN Yanan, PANG Yong, ZHAO Wei, et al. Study on flux of pollutants discharged into western Wangyu River Basin through main inflow river channels [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2): 26-33. (in Chinese))

[3] 许朋柱,秦伯强. 2001—2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量[J]. 湖泊科学,2005,17(3):213-218. (XU Pengzhu, QIN Boqiang. Water quantity and pollutant fluxes of surrounding rivers of Lake Taihu during the hydrological year of 2001—2002 [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(3): 213-218. (in Chinese))

[4] 马倩,刘俊杰,高明远. 江苏省入太湖污染量分析(1998—2007 年)[J]. 湖泊科学,2010,22(1):29-34. (MA Qian, LIU Junjie, GAO Mingyuan. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province, 1998—2007 [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1): 29-34. (in Chinese))

[5] 余辉,燕姝雯,徐军. 太湖出入湖河流水质多元统计分析[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(6):696-702. (YU Hui, YAN Shuwen, XU Jun. Multivariate statistical analysis of water quality in the inflow and outflow rivers of Lake Taihu [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(6): 696-702. (in Chinese))

[6] 燕姝雯,余辉,张璐璐,等. 2009 年环太湖入出湖河流水量及污染负荷通量[J]. 湖泊科学,2011,23(6):855-862. (YAN Shuwen, YU Hui, ZHANG Lulu, et al. Water quantity and pollutant fluxes of inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2009 [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(6): 855-862. (in Chinese))

[7] 杨哲,钟晓辉,次新波,等. 苕溪污染物入湖通量研究[J]. 浙江大学学报:理学版,2013,40(2):196-206. (YANG Zhe, ZHONG Xiaohui, CI Xinbo, et al. Research on pollutant discharge loads from Tiaoxi to Taihu [J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2013, 40(2): 196-206. (in Chinese)) (下转第 50 页)

(1): 63-33. (XIONG Ying, SU Zhigang, GAO Juming. Research on grow and purification capacity of emerging plants of seven species [J]. Environmental Science and Management,2011,36(1) :63-33. (in Chinese))

[7] 黄蕾,翟建平,蒋鑫焱,等. 三种水生植物在不同季节去污能力的对比研究[J]. 环境保护科学,2005,31:44-47. (HUANG Lei, ZAI Jianping, JIANG Xinyan, et al. Experimental study of decontamination ability of three hydrophytes in different seasons [J]. Environmental Protection Science,2005,31:44-47. (in Chinese))

[8] 杨德敏,曹文志,陈能汪,等. 厦门城市降雨径流氮、磷污染特征[J]. 生态学杂志,2006,15(6) :625-628. (YANG Demin,CAO Wenzhi,CHEN Nengwang,et al. Nitrogen and phosphorus pollution from urban stormwater runoff in Xiamen City[J]. Chinese Journal of Ecology,2006,15(6) : 625-628. (in Chinese))

(收稿日期:2015-12-10 编辑:徐 娟)

(上接第 22 页)

[73] ALTMANN D,STIEF P,AMANN R,et al. Nitrification in freshwater sediments as influenced by insect larvae: quantification by microsensors and fluorescence in situ hybridization[J]. Microbial Ecology,2004,48(2) : 145-153.

[74] STIEF P, SCHRAMM A. Regulation of nitrous oxide emission associated with benthic invertebrates [J]. Freshwater Biology,2010,55:1647-1657.

[75] SVENNINGSSEN N B, HEISTERKAMP I M, SIGBY-CLAUSEN M, et al. Shell biofilm nitrification and gut denitrification contribute to emission of nitrous oxide by the invasive freshwater mussel Dreissena polymorpha (zebra mussel) [J]. Applied and Environmental Microbiology,2012,78(12) : 4505-4509.

[76] STIEF P, ELLER G. The gut microenvironment of sediment-dwelling Chironomus plumosus larvae as characterised with O₂, pH, and redox microsensors [J]. Journal of Comparative Physiology: B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology,2006,176(7) : 673-683.

[77] SUN Xu, HU Zhixin, JIA Wen, et al. Decaying cyanobacteria decrease N₂O emissions related to diversity of intestinal denitrifiers of Chironomus plumosus [J]. Journal of Limnology,2015,74(2) : 261-271.

(收稿日期:2015-10-01 编辑:徐 娟)

(上接第 41 页)

[8] 罗缙,逢勇,林颖,等. 太湖流域主要入湖河道污染物通量研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(2) : 131-135. (LUO Jin, PANG Yong, LIN Ying, et al. Study on flux of pollutants discharged into Taihu Lake through main inflow river channels [J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2005,33(2) : 131-135. (in Chinese))

[9] LI Weixin,ZHANG Yongchun,LIU Zhuang,et al. Outline for establishment of the Taihu Lake Basin early warning system[J]. Ecotoxicology,2009,18:768-771.

[10] 李维新,张永春,张海平,等. 太湖流域水环境风险预警系统构建[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(增刊1) : 4-8. (LI Weixin, ZHANG Yongchun, ZHANG Haiping, et al. Construction of water environmental risk early warning system for Taihu Lake Basin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2010,26(Sup1) : 4-8. (in Chinese))

[11] 罗缙. 平原河网区水环境时空变化模拟技术及应用研究:以太湖流域为例[D]. 南京: 河海大学,2009.

[12] 谢蓉蓉,逢勇,王晓,等. 基于太湖流域跨界断面的跨界水环境综合管理区及控制单元划分研究[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版,2015,31(1) : 103-109. (XIE Rongrong, PANG Yong, WANG Xiao, et al. Delineation of the water environmental comprehensive management area and control unit in the trans-river cross-section of Taihu Basin[J]. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition,2015,31(1) :103-109. (in Chinese))

(收稿日期:2015-10-08 编辑:彭桃英)

(上接第 45 页)

[5] 建城函[2014]275号 海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[S]

[6] 廖朝轩,江育铨. 都市水环境与雨水利用计划[J]. 台湾环境与土地,2014,2(2) : 50-59. (LIAW Chaohsien, JIANG Yuquan. Urban water environment and rainwater utilization plan[J]. Taiwan Environment and Land,2014,2(2) :50-59. (in Chinese))

[7] LIAW Chaohsien, TSAI Y L, CHENG M S. Hydrologic analysis of distributed small-scale stormwater control systems [J]. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering,2005,23(1) : 1-12.

[8] 鞠茂森. 关于海绵城市建设理念、技术和政策问题的思考[J]. 水利发展研究,2015(3) : 7-10. (JU Maosen. Reflections on the concept, technology and policy of sponge city construction [J]. Water Resources Development Research,2015(3) :7-10. (in Chinese))

[9] National Research Council. Urban stormwater management in the United States [M]. New York: The National Academics Press,2009.

[10] Water Environment Federation. Design of urban stormwater controls[M]. New York: McGraw Hill,2012.

(收稿日期:2015-10-08 编辑:彭桃英)