

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.008

# 苏南运河对太湖主要入湖河流污染物通量的贡献率

韦雨婷<sup>1</sup>, 逢 勇<sup>2</sup>, 罗 缙<sup>2</sup>, 王 雪<sup>1</sup>

(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:** 为了解苏南运河对太湖主要入湖河流污染物通量的贡献, 基于一维平原河网水量、水质数学模型, 模拟计算了 2011 年受苏南运河影响的主要入湖河流的入湖污染物通量(COD、氨氮、TN、TP), 量化分析了苏南运河对主要入湖河流入湖污染物通量的贡献率。研究表明: 苏南运河主要影响湖西区的太湖主要入湖河流, 对湖西区主要入湖河流入湖通量的总体贡献率约为 23%, 其中对太滬运河的贡献率最大, 约 42%, 漕桥河次之, 约 23%, 对太滬南运河、社渚港、陈东港污染物通量的贡献率由北向南依次减小。

**关键词:** 入湖河流; 污染物通量; 贡献率; 苏南运河; 太湖

**中图分类号:** X824      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2015)05-0042-05

## Study on pollutant flux contribution rate of Sunan Canal to main inflow rivers of Taihu Lake

WEI Yuting<sup>1</sup>, PANG Yong<sup>2</sup>, LUO Jin<sup>2</sup>, WANG Xue<sup>1</sup>

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

2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study the pollutant flux influence of Sunan Canal on main inflow rivers of Taihu Lake, a 1-D water quantity and water quality model of the plain river network is established; the pollutant flux, including chemical oxygen demand (COD), ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), in main inflow rivers contributed by Sunan Canal is simulated; and the pollutant flux contribution rate of Sunan Canal on main inflow rivers is quantified. The results indicate that Sunan Canal mainly influence the inflow rivers in the west of Taihu Lake, which is quantified as 23%. Sunan Canal contribute most to Taige Canal (42%) and then Caoqiao River (21%). The pollutant flux contribution rate of Sunan Canal on South Taige Canal, Shedu River, Chendong River decrease successively from north to south.

**Key words:** main inflow river; pollutant flux; contribution rate; Sunan Canal; Taihu Lake

随着太湖流域经济的迅猛发展, 各类废污水排放量剧增, 太湖水质污染已成为当地社会经济可持续发展面临的突出问题, 水污染防治是太湖流域面临的一项重要任务<sup>[1]</sup>。为确保太湖水质达标, 除了对现状污染进行治理外, 从源头减少向太湖排污也十分关键, 必须保证各主要入湖河流水质达标。

在污染物总量控制研究中, 污染物通量的研究

比污染物浓度更有价值<sup>[2]</sup>。目前, 太湖流域污染物通量的研究已取得了一定的成果, 罗缙等<sup>[3]</sup>利用全太湖流域平原河网水量水质模型及污染负荷模型, 对太湖流域丰、平、枯不同典型年不同季节主要入湖河道污染物入湖量进行了全面系统的计算分析; 陈亚男等<sup>[1,4]</sup>以主要入湖河流之一——望虞河为研究对象, 利用水量、水质计算模型, 分析了望虞河各支

流的污染物通量,确定了主要污染支流。然而,现有的太湖流域入湖河流污染物通量研究中未考虑上游输入河网对入湖河流污染物通量的影响。本文基于一维河网水量水质数学模型,模拟2011年苏南运河与太湖主要入湖河流构成的平原河网区污染物输送及其转化过程,计算分析受苏南运河影响的各主要入湖河流2011年的入湖污染物通量,在此基础上,量化分析苏南运河对各主要入湖河流污染物通量的贡献关系,以期为太湖流域污染治理提供参考依据。

## 1 研究区概况

苏南运河及太湖主要入湖河流研究区地处江苏省南部、中国经济发达的长江三角洲中部,北靠长江,南至太湖边界。苏南运河北起镇江谏壁,南至苏州平望,全长210 km。苏南运河直接影响的太湖主要入湖河流有梁溪河、小溪港、直湖港、武进港,通过其支流武宜运河间接影响的太湖主要入湖河流有太滆运河、漕桥河、太滆南运河、社渚港、陈东港。

根据研究区域内水利工程实地调研结果,由于武进港、直湖港入湖闸门目前已被封堵,武进港、直湖港的污染物由原先经雅浦港汇入太湖变为目前经锡溧运河流入太滆运河,最终汇入太湖,故认为武进港、直湖港的入湖污染物通量均为零;梁溪河流向常年向东流入京杭运河,全年入湖污染物通量为零;小溪港闸门长期封闭,开闸时从太湖往外抽水,全年入湖污染物通量为零。本文在分析苏南运河对太湖主要入湖河流污染物通量的贡献时不再考虑运河对武进港、直湖港、梁溪河、小溪港这4条入湖河流的影响,着重分析运河对湖西区太滆运河、漕桥河、太滆南运河、社渚港、陈东港5条入湖河流污染物通量的贡献情况。

## 2 模型建立

### 2.1 模型基本方程

#### 2.1.1 水量模型

采用一维模型模拟苏南运河及太湖主要入湖河流构成的平原河网区水流流态,一维模型描述河流水流运动的方程组是建立在质量及动量守恒定律基础上的 Saint-Venant 方程组<sup>[5-8]</sup>,其完全形式为

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = qv_x \end{cases} \quad (1)$$

式中: $q$ 为单位河流旁侧入流; $Q$ 为河道断面流量; $A$ 为过水断面面积; $B$ 为河宽; $Z$ 为水位; $v_x$ 为旁侧入流流速在水流方向上的分量,一般近似为零; $K$ 为流

量模数,反映河道的实际过流能力; $\alpha$ 为动量校正系数,反映河道断面流速分布均匀性; $x$ 为空间坐标; $t$ 为时间坐标。

采用 Preissman 四点线性隐式格式对上述方程组进行离散。离散后,经过处理形成河网区统一的节点水位、流速线性方程组,其求解采用矩阵标识法,最终可求得河流各断面的水位及流量。

#### 2.1.2 水质模型

水质模型采用一维河流水质模型,其基本方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - KC \quad (2)$$

式中: $C$ 为模拟物质的浓度; $u$ 为河流平均流速; $E_x$ 为对流扩散系数; $K$ 为模拟物质的一级衰减系数。

对流扩散系数是一个综合参数,包含了分子扩散、湍流扩散以及剪切扩散效应。而在水质数值模型中,对流扩散系数除了和物理背景相关之外,还和计算空间大小、时间步长等相关。水质模型通过以下经验公式来估算对流扩散系数:

$$E_x = av^b \quad (3)$$

式中: $v$ 是流速,来自水动力计算结果; $a$ 和 $b$ 是设定的参数。

水质模型的边界条件可以由2011年太湖流域控制断面水质监测资料分析得到。

## 2.2 模型率定

### 2.2.1 水量模型参数率定

根据《长江流域水文年鉴(太湖区)》2011年逐日流量及水位监测资料,选取苏南运河及主要入湖河流平原河网区典型的水文站、水位站,采用试错法进行水动力模型参数率定,即根据各水文站、水位站实测的流量、水位资料,调试模型中各河道的糙率,使模型计算值与实测值相吻合。经过率定,苏南运河及主要入湖河流平原河网区的河道糙率为0.018~0.025。从图1和图2可知,模型计算值与实测值吻合较好,水位绝对误差平均约为0.02 m,流量相对误差平均约为10.4%,故建立的水量模型能较为准确地模拟该河网区河流水流流态。

### 2.2.2 水质模型参数率定

根据苏南运河及主要入湖河流平原河网区污染源及水质污染的特点,即区域内主要污染源为生活污染,且主要超标因子氨氮、TN、TP的排放强度大,选择污染因子COD、氨氮、TN、TP作为水质模拟对象,采用2011年1—12月太湖流域控制断面水质监测资料进行率定,率定得到的COD降解系数为0.09~0.11 d<sup>-1</sup>,氨氮降解系数为0.05~0.07 d<sup>-1</sup>,TN降解系数为0.08~0.10 d<sup>-1</sup>,TP降解系数为

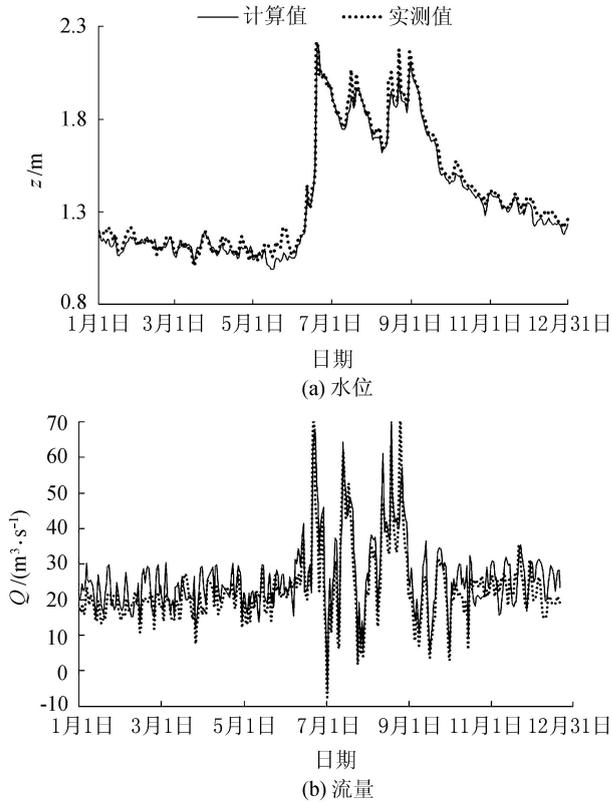


图1 太滬运河黄埭桥断面 2011 年水位、流量率定结果

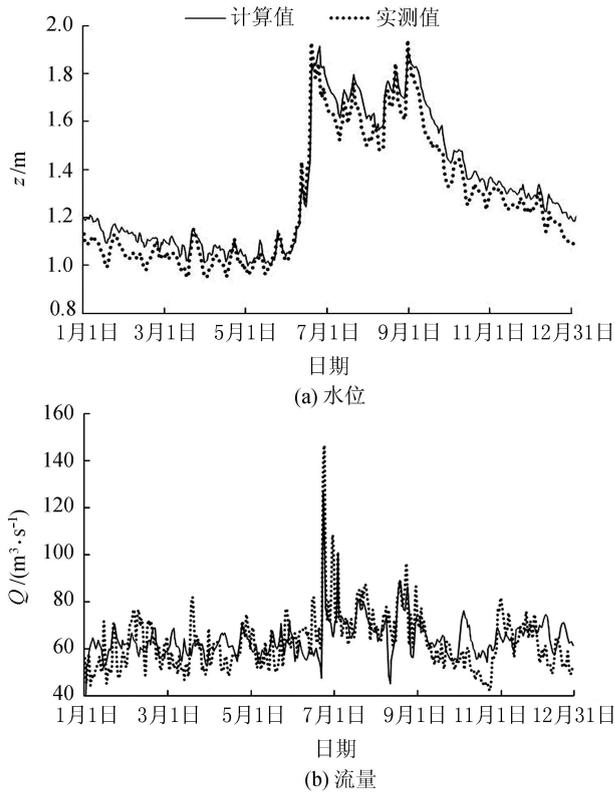


图2 苏南运河枫桥断面 2011 年水位、流量率定结果

$0.04 \text{ d}^{-1}$ 。水质模型的计算值与实测值对比如图 3 和图 4 所示,模型率定相对误差见表 1。由表 1 可知,率定的水质计算结果与大部分实测值吻合较好,故该模型可用于描述苏南运河及主要入湖河流平原河网区水质变化过程。

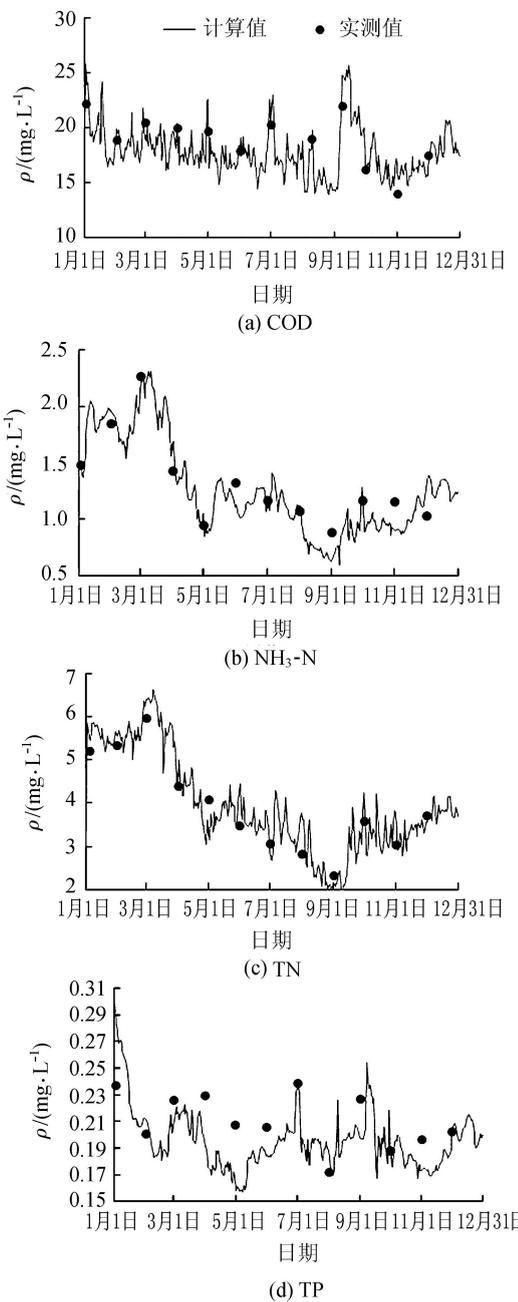


图3 太滬运河分湖断面 2011 年水质率定结果

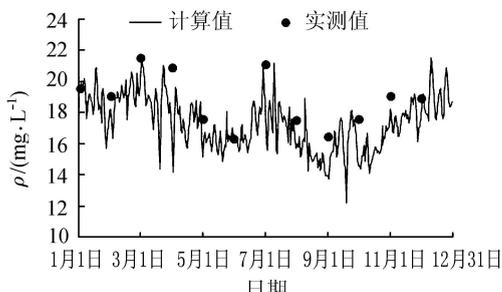
表 1 2011 年水质资料率定相对误差统计 %

水质指标	$E_{<20\%}$	$E_{<30\%}$
COD	33.3	58.3
$\text{NH}_3\text{-N}$	25.0	54.2
TN	29.2	56.3
TP	31.3	52.1

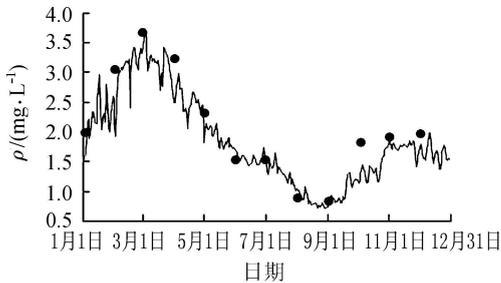
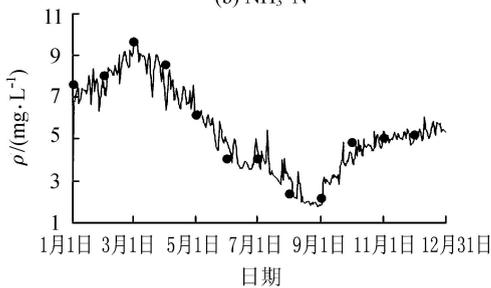
注:  $E_{<20\%}$ 、 $E_{<30\%}$  分别表示模型率定误差小于 20%、30% 所占的百分比<sup>[1,3]</sup>。

### 3 计算方法

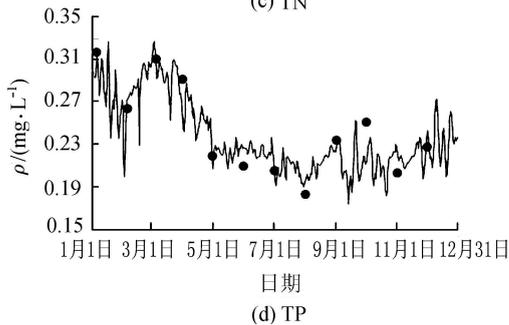
根据经率定的河网水量、水质模型计算出各主要入湖河流逐日平均流量、逐日平均水质质量浓度,利用下式计算各主要入湖河流入湖污染物通量值<sup>[9]</sup>:



(a) COD

(b) NH<sub>3</sub>-N

(c) TN



(d) TP

图4 苏南运河五牧断面2011年水质率定结果

$$W_i = 0.0864 \sum_{j=1}^{365} \rho_{i,j} Q_{i,j} \quad (4)$$

式中:  $W_i$  为入湖河流  $i$  入湖污染物通量,  $t/a$ ;  $\rho_{i,j}$  为入湖河流  $i$  第  $j$  日平均水质质量浓度,  $mg/L$ ;  $Q_{i,j}$  为入湖河流  $i$  第  $j$  日的流量,  $m^3/s$ 。

本文着重关注苏南运河对各主要入湖河流污染物通量的贡献量, 贡献量的计算基于模型计算结果,

表2 2011年苏南运河对各主要入湖河流污染物通量贡献

河流名称	COD		NH <sub>3</sub> -N		TN		TP	
	通量值	运河贡献	通量值	运河贡献	通量值	运河贡献	通量值	运河贡献
太滬运河	33 169	14 735	3 515	1 396	7 708	3 184	364	157
漕桥河	6 688	1 654	1 070	250	2 846	638	147	32
太滬南运河	10 361	1 673	1 043	148	5 409	805	141	23
社渚港	16 857	2 144	1 526	161	5 251	656	298	34
陈东港	20 835	1 548	1 829	127	9 092	744	203	13
合计	87 910	21 754	8 983	2 082	30 306	6 027	1 153	259

计算出苏南运河通过其支流影响入湖河流的初始污染物通量  $W_0$ , 考虑污染物输移过程中降解、分流等影响, 利用下式计算苏南运河对某入湖河流污染物通量的贡献量:

$$W_i = W_0 \prod_{j=1}^n \alpha_j \exp \left[ -\frac{k(x_j - x_{j-1})}{86400u} \right] \quad (5)$$

式中:  $W_i$  为苏南运河对入湖河流  $i$  污染物通量的贡献量,  $t/a$ ;  $n$  为分流次数;  $\alpha$  为分流比(图5), 由模型计算结果得出;  $x_j$  为第  $j$  次分流处距苏南运河与武宜运河交界点的距离 ( $x_0 = 0 m$ ),  $m$ ;  $k$  为水质降解系数,  $d^{-1}$ ;  $u$  为水流流速,  $m/s$ 。

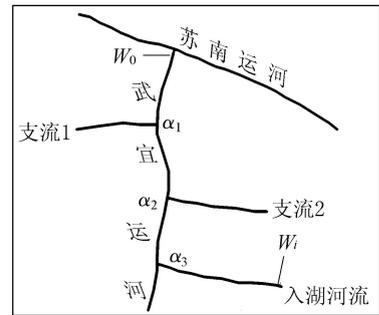


图5 苏南运河污染物通量贡献量计算示意图

#### 4 计算结果及分析

2011年湖西区太滬运河、漕桥河、太滬南运河、社渚港、陈东港5条太湖主要入湖河流入湖污染物通量计算结果以及苏南运河对湖西区各主要入湖河流污染物通量的贡献情况见表2。由表2可知: 太滬运河的入湖污染物通量相对于湖西区其他入湖河流较大, 主要输送来自常州武进区、无锡地区的大量污染物; 其次为陈东港、社渚港、太滬南运河, 主要输送来自溧阳和宜兴的污染物; 漕桥河相对于湖西区其他几条入湖河流入湖通量较小。

由于武进港、直湖港闸门关闭后, 污染物去向由原先的经武进港、直湖港流入太湖转变为现在经锡溧漕运河流进太滬运河, 故苏南运河对太滬运河COD、氨氮、TN、TP污染物通量的贡献率较大, 年均污染物通量的贡献率约42%; 苏南运河对漕桥河污染物通量的影响位居湖西区主要入湖河流第二, 贡献率约23%; 由于地理位置因素, 苏南运河对太滬

南运河、社渎港、陈东港污染物通量的年均贡献率由北向南依次减小,分别为15%、12%、7%。

苏南运河虽然作为上游来水,与太湖水量交换频繁,但其对湖西区主要入湖河流入湖通量的整体贡献率约为23%,除对太溇运河影响较大外,对其他湖西区入湖河流污染物通量的影响不明显。

## 5 结 论

a. 受苏南运河影响的湖西区5条主要入湖河流(太溇运河、漕桥河、太溇南运河、社渎港、陈东港)2011年污染物入湖总量COD为87910t、氨氮为8983t、TN为30306t、TP为1153t,其中,太溇运河的入湖污染物通量值最大。

b. 作为上游来水,苏南运河对湖西区主要入湖河流污染物通量的整体贡献率约23%,其中,对太溇运河污染物通量的贡献率最大,约42%,漕桥河次之,约23%,对太溇南运河、社渎港、陈东港污染物通量的贡献率由北向南依次减小。

## 参考文献:

- [1] 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):26-28. (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):26-28. (in Chinese))
- [2] 李科,高旭,郭劲松. 梁滩河流域污染物通量研究[J]. 三峡环境与生态,2011,33(2):6-9. (LI Ke, GAO Xu, GUO Jinsong. Study on Liangtan River Basin pollution flux [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges,2011,33(2):6-9. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 沈爱春. 望虞河引江对太湖的影响研究[J]. 水资源保护,2002(4):29-32. (SHEN Aichun. Impacts of water diversion from Yangtze River on water environment of Taihu Lake[J]. Water Resources Protection, 2002(4):29-32. (in Chinese))
- [5] 韩龙喜,陆冬. 平原河网水流水质数值模拟研究展望[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(2):127-130. (HAN Longxi, LU Dong. Prospects of water quality numerical simulation for plain river network[J]. Journal of

Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(2):127-130. (in Chinese))

- [6] 丁训静,姚琪,阮晓红. 太湖流域污染负荷模型研究[J]. 水科学进展,2003,14(2):189-192. (DING Xunjing, YAO Qi, RUAN Xiaohong. Waste load model for the Taihu Basin[J]. Advances in Water Science,2003,14(2):189-192. (in Chinese))
- [7] 卢士强,徐祖信. 平原河网水动力模型及求解方法探讨[J]. 水资源保护,2003(3):5-9. (LU Shiqiang, XU Zuxin. Hydrodynamic model for plain river networks and its solution[J]. Water Resources Protection,2003(3):5-9. (in Chinese))
- [8] 王超,卫臻,张磊,等. 平原河网区调水改善水环境实验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(3):136-138. (WANG Chao, WEI Zhen, ZHANG Lei, et al. Experimental study on improvement of water environment by water diversion in plain river networks[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(3):136-138. (in Chinese))
- [9] 胡嘉镗,李适宇. 模拟珠江河网的污染物通量及外源输入对入河口通量的贡献[J]. 环境科学学报,2012,32(4):828-835. (HU Jiatang, LI Shiyu. Modeling the pollutant flux in the Pearl River network and the contribution of external waste loads to the riverine flux[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4):828-835. (in Chinese))

(收稿日期:2014-09-09 编辑:熊水斌)

## · 简讯 ·

### 纪念河海大学建校100周年、《水资源保护》 创刊30周年特刊紧急征稿进展

2015年喜逢河海大学建校100周年和《水资源保护》创刊30周年。为了纪念河海大学建校100周年和《水资源保护》创刊30周年,《水资源保护》编辑部于2015年8月初开展了面向全国知名教授、专家,尤其本刊编委紧急征稿的活动,拟于2015年10月底出版纪念河海大学建校100周年、《水资源保护》创刊30周年特刊(正刊出版)。征稿得到了全国范围内专家、教授,尤其本刊编委的大力支持,截至2015年9月10日,已经收到高质量来稿12篇,已经答应赐稿,但还没有来稿的有10余人。预计到约定的出版时间——2015年10月下旬,一本高质量的纪念河海大学建校100周年和《水资源保护》创刊30周年的特刊将呈现在广大读者面前。

(本刊编辑部供稿)