

张恒,曾凡棠,房怀阳等. 2012. 基于 HSPF 及回归模型的淡水河流域非点源负荷计算[J]. 环境科学学报 32(4): 856-864
Zhang H , Zeng F T , Fang H Y , et al. 2012. Estimating nonpoint pollution loading from the Danshui catchment based on HSPF and regression model [J].
Acta Scientiae Circumstantiae 32(4): 856-864

基于 HSPF 及回归模型的淡水河流域非点源负荷计算

张恒^{1,2}, 曾凡棠^{1,*}, 房怀阳¹, 张恒军¹, 萧洁儿¹, 林澍¹

1. 环境保护部华南环境科学研究所 环境模拟与污染控制中心, 广州 510655
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640
收稿日期: 2011-05-18 修回日期: 2011-06-16 录用日期: 2011-07-21

摘要: 应用分布式水文模型 HSPF 结合回归模型, 对广东省东江流域中淡水河流域的非点源负荷进行计算. 研究结果显示, 模型较好地再现了悬浮泥沙(SS)、COD_{Cr}、NO₃⁻-N 及 TP 在 2010 年内的通量随时间的变化过程. 统计结果表明, 淡水河流域的 SS、COD_{Cr}、NO₃⁻-N 及 TP 在汛期的通量对年通量的贡献十分显著, 分别占年通量的 86.81%、77.56%、69.83% 和 73.08%; NH₄⁺-N 和 TN 的计算结果与实测值之间拟合程度较弱, 可能是由于这两类污染物与人类活动的点源排放关系密切, 而本研究中所用回归方程只考虑了径流量与污染物通量之间的关系, 并没有更多地考虑与人类活动相关的因素.

关键词: HSPF; 回归模型; 淡水河流域; 非点源负荷

文章编号: 0253-2468(2012)04-856-09 中图分类号: X171 文献标识码: A

Estimating nonpoint pollution loading from the Danshui catchment based on HSPF and regression model

ZHANG Heng^{1,2}, ZENG Fantang^{1,*}, FANG Huaiyang¹, ZHANG Hengjun¹, XIAO Jie'er¹, LIN Shu¹

1. Research Center of Environmental Simulation and Pollution Control, South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655
2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640

Received 18 May 2011; received in revised form 16 June 2011; accepted 21 July 2011

Abstract: In this study, the streamflow simulated by HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran) and a regression model were used to estimate nonpoint source loading of the Danshui catchment in Dongjiang watershed, Guangdong Province. Results showed that the regression model made a reasonable reproduction of the temporal variation of pollutant fluxes during 2010. Statistical results indicated the significant contribution of pollutant fluxes during wet season to annual fluxes. The fluxes of SS, COD_{Cr}, NO₃⁻-N and TP contributed 86.81%, 77.56%, 69.83% and 73.08% to their annual fluxes, respectively. Regression model in this study only established the linkage between streamflow and pollutant fluxes. Other factors, such as anthropogenic activities, were not included. Thus, the weak correlation between NH₄⁺-N, TN computed fluxes and observed value may be due to the close relationship between these nutrients and point source discharge from anthropogenic activities.

Keywords: HSPF; regression model; Danshui catchment; nonpoint source pollution loading

1 引言(Introduction)

近年来, 由于社会经济发展、人口数量激增、土地利用类型的改变及农业产业的发展, 输入至河流、湖泊、河口及近海的各类营养盐及耗氧有机污染物数量大幅增加, 引起诸如富营养化、水体缺氧、生物多样性受损等一系列环境问题(Goolsby *et al.*, 2000, Lin *et al.*, 2007, Sanders *et al.*, 1997, Zhang *et al.*, 2010). 由于各类营养盐及耗氧有机污染物主

要由流域内受人类活动影响的点源、非点源污染所产生, 因此, 定量确定流域内不同子流域或地区各类污染物的污染负荷是人们对流域水环境进行有效管理的先决条件.

为更有效地进行流域水质管理, 人们通过各种不同的方法确定流域内各种污染物的污染负荷产生量. 一些研究者首先是针对不同土地利用类型地块建立径流场, 通过人工和天然降雨实验的方式研究实验地块的污染负荷产生量(傅大放等, 2009, 高

基金项目: 国家重大科技专项(No. 2008ZX07011-0010)

Supported by the National Science and Technology Major Project (No. 2008ZX07011-0010)

作者简介: 张恒(1981—), 男, 博士, E-mail: zhangheng@scies.org; * 通讯作者(责任作者), E-mail: zengfantang@scies.org

Biography: ZHANG Heng (1981—), male, Ph. D., E-mail: zhangheng@scies.org; * Corresponding author, E-mail: zengfantang@scies.org

扬等, 2008). 这种通过实验方法确定不同类型地块污染负荷产生量的方法虽然最为准确, 但由于实验对象本身面积有限, 远小于流域面积, 加上污染物在陆面的输运和生化反应过程相当复杂, 如果直接将小尺度的结果应用于大尺度, 存在一定的不确定性. 为了更好地从宏观上把握流域非点源负荷产生量及其空间分布特征, 不少研究者利用 RS 和 GIS 技术, 基于有限的实测数据通过统计分析建立经验统计模型, 结合流域内的年降雨量、暴雨发生次数、土地利用类型、DEM 等数据来求得流域尺度各子流域的污染负荷系数 (Broad *et al.*, 2011, Liang *et al.*, 2008). 这样利用 RS、GIS 技术通过空间叠加分析方法所求得的污染负荷系数, 其综合考虑因素比单纯径流场实验的考虑因素更多, 结果相对也更为合理, 但还存在一些问题. 最主要的问题有两个, 一是模型所求得的非点源负荷是以年为时间尺度单位, 但非点源多与降雨相关, 降雨在年内的日变化及月变化一般都较为显著, 但此类模型多以年降雨为输入条件, 不利于在实际管理中的应用; 二是模型计算所得的污染负荷量只是单位面积上的污染物产生量, 并不代表所在子流域最终的污染物入河量, 两者之间存在一定差异.

为了解决上述基于实验及经验模型估算污染负荷产生量存在的问题, 在近年来数值模拟技术迅速发展, 基于物理、生化过程所构建的流域分布式产汇污模型, 如 SWAT、HSPF、AnnAGNPS 等被越来越多的研究人员应用于流域产汇污研究 (Filoso *et al.*, 2004, Huang *et al.*, 2010, Ullrich *et al.*, 2009). 流域分布式产汇污模型的特点是多以逐日甚至逐时气象条件作为输入条件, 并结合 DEM、土地利用类型图及土壤类型图将研究流域划分为多个计算单元, 能对流域内的产汇流、产汇污过程进行逐日至逐时尺度的模拟. 但应该指出的是, 由于流域分布式模型在模拟时对所需要的输入数据的时空分辨率及数量要求都很高, 特别是在进行产汇污模拟时所要求的大量点源排放数据 (排放量、排放时间、排放位置)、大气沉降、农业作业模式数据 (不同子流域化肥施用量、施用时间、施用方式、农作物类型等) 在实际中往往难以获取. 因此, 流域分布式模型对污染物的模拟结果极大地依赖于污染源数据, 如果污染源的数据不完整, 加上模型本身假设的陆面产污及河道汇污的机理过程假设不一定与实际完全相符, 就有可能造成模拟结果

与实际存在较大偏差.

综上所述, 以实验或野外观测方法所构建的经验统计模型与流域分布式产汇污模型各有其优缺点. 为了充分发挥这两种模型的优点, 不少研究人员在污染源数据难以获取的流域将统计模型与流域分布式模型结合在一起对流域污染物的输出通量进行计算 (Chang *et al.*, 2008, Sherstha *et al.*, 2008). 在本研究中, 将利用 HSPF 流域分布式模型对广东省东江流域的淡水河流域进行产汇流模拟, 先计算出流域出口的地表径流过程. 然后, 根据淡水河流域出口的水质、水量同步监测数据, 构建水量与污染物通量之间的统计模型. 最后, 根据已经过率定的地表径流模拟值, 通过统计模型计算各类污染物的通量过程. 以为合理估算流域非点源污染负荷提供一种新的思路及方法.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区域概况

本次研究区域为淡水河流域, 淡水河为广东省东江的二级支流, 流域南北跨越深圳、惠州两市, 是广东省内一条典型的跨市河流 (图 1). 淡水河流域的相关自然、地理及土地利用状况可见已有的研究成果 (张恒等, 2011). 淡水河流域面积为 1015.34 km², 流域内人口总计 356.45 万人. 改革开放以来, 在深圳市境内的淡水河上游流域社会经济迅速发展、人口急剧增加、土地利用类型变化显著. 产生的大量污染物在进入河流后, 不但使得当地水质恶化, 影响到下游群众的用水安全, 也影响到当地的可持续发展 (江涛等, 2009).

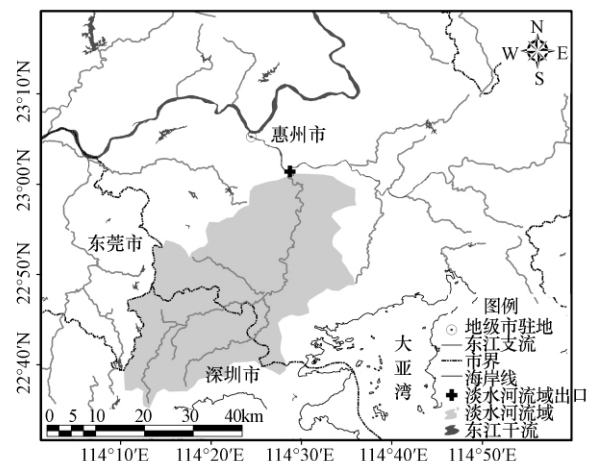


图 1 淡水河流域示意图

Fig. 1 Map of the Danshui catchment

2.2 同步水文、水质观测数据

为获取淡水河流域出口的同步水文、水质数据,以构建淡水河流域的分布式产汇流模型及污染物通量与径流量之间的回归统计模型,本研究在参考国内外同类研究的基础上(Yoon *et al.*, 2010, 胡远安等, 2004),于2010年1月在淡水河流域出口建立一个有人值守的污染物通量站,通量站选在惠州市三栋镇鹿颈村内淡水河的桥梁上进行安装,有关通量站的仪器构成、测流方法、连续流量的推求及仪器率定等细节可见课题组的相关研究成果(张恒等, 2011). 2010年下半年,考虑到简化仪器日常维护程序,将原来仪器直接与沉底锚石相连,改进为仪器通过活动圆环与主钢索相连(图2). 由于目前YSI 6920自动水质仪只能测量溶解氧及氨氮两类水质参数,因此,课题组安排两名研究人员长驻淡水河通量站,从2010年3月起每天实施人工水样采集(流域内没有降雨期间、洪季期间每天早午晚共采样3次,流域内降雨期间及降雨后实行每2h进行1次加密采样,枯季期间则每天1次). 在淡水河通量站2010年运行期间,较为完整地进行了7次降雨过程的水样采集,其余降雨期间的水质采样均只覆盖了降雨期间的部分时段. 水样采集后,先放入驻地冰箱进行保存,再送实验室进行分析. 主要分析项目有 BOD_5 、 COD_{Cr} 、TN、TP、 $NO_3^- - N$ 、 $NH_4^+ - N$ 和SS(悬浮泥沙).

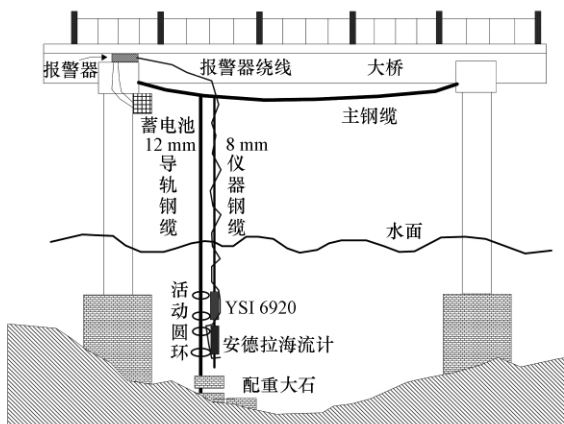


图2 污染物通量站安装改进示意图

Fig. 2 Schematic of the pollutant flux station after improved

2.3 HSPF 模型简介

HSPF (Hydrological Simulation Program-FORTRAN) 是由美国环保署 (USEPA) 于 20 世纪 80 年代开发的流域分布式模型 (Bicknell *et al.*, 2001). HSPF 的时间步长可以在 1 min 至 1 d 内任意设置,可以对中小

流域 1 d 内逐时甚至更小时间尺度的产汇流、产汇污过程进行事件性的连续模拟. HSPF 的基本计算单元为子流域,并没有像 SWAT 那样在子流域内再细分尺度更小的计算单元. HSPF 在计算上采用模块化设计,它主要包括 3 大模块,分别为透水地模块 (PERLND)、不透水地模块 (IMPLND) 和河道及水库模块 (RCHRES). PERLND 主要代表林地、农用地、草地及城镇用地中透水部分的产流与产污模拟,IMPLND 主要代表城镇用地中不透水部分的产流与产污模拟,RCHRES 主要代表河道及水库等地表水体中水量及各种污染物的汇流、汇污(包括点源的输入)模拟,同时还可以模拟物质在地表水体中的生化反应过程.

2.4 淡水河流域 HSPF 产汇流模型的构建

HSPF 的输入数据主要可分为空间属性数据、气象数据及污染源数据 3 类. 空间属性数据主要有流域数字高程模型 (DEM)、土地利用类型图、土壤类型图. 本研究中数字高程模型主要采用美国 NASA 的 SRTM 90 m 分辨率 DEM,土地利用类型图采用中国科学院地理科学与资源研究所地球科学共享数据提供的 100 m 分辨率栅格图,土壤类型图采用中科院南京土壤研究所提供的 1:1000000 土壤类型图;气象数据库的构建采用中国气象局提供的

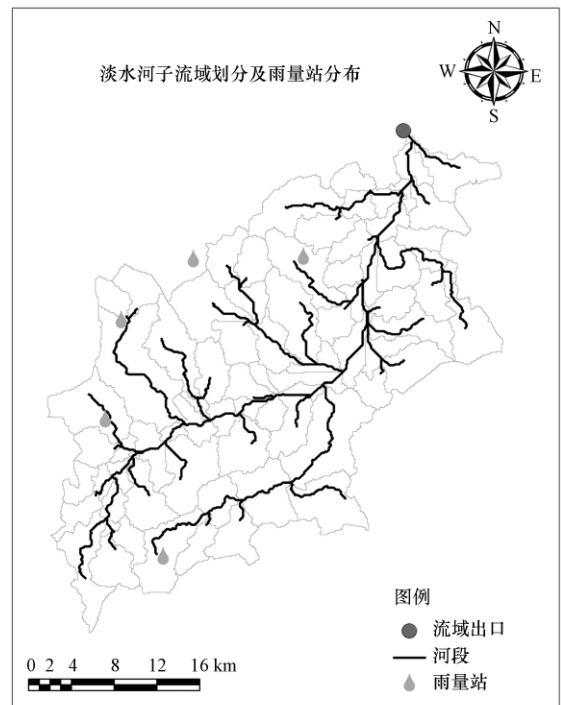


图3 淡水河流域子流域划分及雨量站分布

Fig. 3 Sub-basins and rainfall stations distribution of the Danshui catchment

1956—2010 年东江流域内 5 个站点的气象数据(包括逐日降雨、日最高最低气温、露点温度、云量、风速、相对湿度等),以给定并推算模型用气象数据。HSPF 所用的逐时降雨数据采用广东省水文局提供的淡水河流域内 5 个降雨站 2008—2011 年的逐时降雨数据(图 3)。根据淡水河流域面积和模型的计算考虑,同时也考虑到模型的计算效率及调参的复杂程度,最终采用 1000 hm^2 的划分阈值,将淡水河流域划分为 80 个子流域(图 3)。淡水河流域 HSPF 模型从 2008 年开始预热计算至 2011 年 6 月,流量率定、验证数据直接采用 2.2 节中所提及污染物通量站的流量数据。

3 结果(Results)

3.1 径流模拟结果

2010 年淡水河流域出口的逐时实测和模拟流量时间序列见图 4, HSPF 中主要产汇流模拟参数的率定值见表 1。从图 4 可见,淡水河流域 2010 年的年内降雨主要集中于 4 至 10 月间,其中,以 6 月及 8 至 10 月的降雨强度最大,降雨事件也较为密集。相应地,暴雨径流的极值也出现在 6 月及 8 至 10 月,

各个暴雨事件中实测径流量的峰值介于 $400 \sim 850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。从模拟结果可以看出, HSPF 基本能较好地把握淡水河流域年内地表径流的变化过程,并能对大部分暴雨径流过程得出较合理的模拟结果。对于小部分暴雨径流过程中 HSPF 的模拟结果会高估径流量,可能是由于该部分暴雨径流主要是由于台风登陆所致(如 9 月 21 日的暴雨径流过程是由台风“凡亚比”登陆所致),台风在过境时会造成降雨强度发生剧烈的时空变化,而目前淡水河流域内仅有 5 个降雨站,可能难以准确体现整个流域在台风过境时的降雨时空变化过程,导致模型的模拟结果高估径流量。统计分析结果显示,淡水河流域出口逐时、逐日、逐月的径流量计算值与实测值回归分析的可决系数(R^2)分别为 0.59、0.62、0.77,平均相对误差分别为 38%、25%、19%。虽然逐时径流模拟结果不如逐日及逐月理想,但考虑到淡水河流域受人类活动干扰程度高,加上流域内本身存在一定数量的调控过程未知的中小水库, HSPF 在 2010 年率定期对淡水河流域产汇流过程的模拟结果还是较为合理的。

表 1 淡水河流域 HSPF 模型产汇流模拟参数率定结果

Table 1 Calibration results of parameters for hydraulic simulation in HSPF

参数	定义(单位)	取值范围	率定值
LZSN	下层土壤含水层厚度(inches)	2.0 ~ 15.0	4.0 ~ 6.5
UZSN	上层土壤含水层厚度(inches)	0.05 ~ 2.00	1.128
INTFW	壤中流入流系数*	1.0 ~ 10.0	4.0 ~ 7.5
INFILT	土壤渗水能力(inches·h ⁻¹)	0.001 ~ 0.500	0.2
DEEPPFR	地下水损失系数*	0.0 ~ 0.50	0.1
KVARY	地下水出流系数(inches ⁻¹)	0.0 ~ 5.0	0.0
IRC	壤中流退水率(d ⁻¹)	0.30 ~ 0.85	0.5
PLS NSUR	透水下垫面地表径流曼宁系数*	0.05 ~ 0.50	0.2 ~ 0.4
ILS NSUR	不透水下垫面地表径流曼宁系数*	0.01 ~ 0.15	0.05

注: * 表示无量纲,英寸(inches) 为模型中使用的单位,1 英寸 = 2.54 cm。

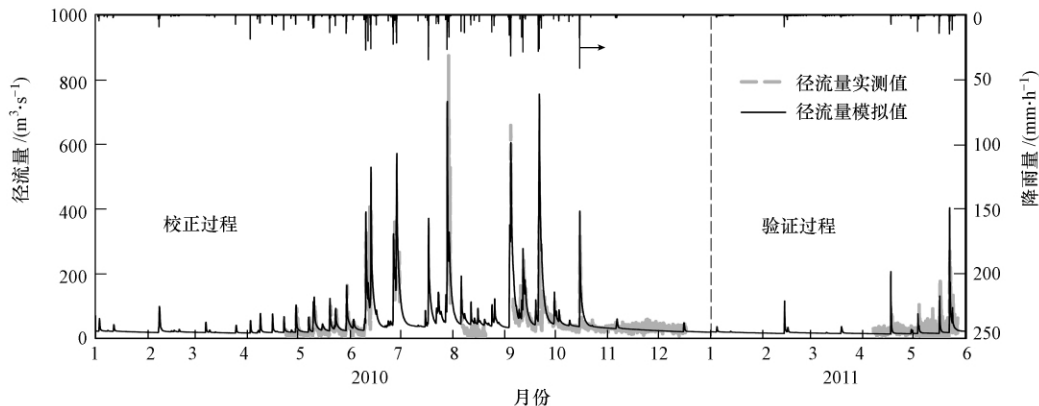


图 4 淡水河流域 2010、2011 年逐时径流量计算值与实测值对比

Fig. 4 Observed and simulated hourly streamflow in the Danshui catchment, 2010 and 2011

在 2011 年 1 月至 5 月的验证期, HSPF 中主要产汇流参数按表 1 设置. 验证过程可见图 4. 从验证结果可以看出, HSPF 基本可以反映出 2011 年 1 月至 5 月间淡水河流域由于强对流降雨所引致的产汇污过程, 对峰值流量的出现时间也可以较准确地捕捉下来. 但模型在 5 月上半月的模拟过程中明显对一些降雨过程的流量估算不足, 这除了前面提到的流域内部分中小水库的运行方式无法掌握外, 还可能与目前流域内用于输入条件的降雨站数据较少, 并不能较好地代表流域内降雨的时空分布有关.

3.2 水质监测结果

淡水河流域 2010 年的水质监测结果汇总见表 2. 从表中可以看出, 除 SS 外, COD_{Cr} 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 在洪季时的监测平均值明显低于或接近枯季监测值. 洪季 SS、 COD_{Cr} 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TN 的最大值分别是最小值的 497、9.14、139.98 和 25.9 倍, 从这 4 种物质浓度在洪、枯季的标准偏差也可以看出它们在洪季期间浓度变化幅度高于枯季. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 浓度的季节性变化特征与 SS、 COD_{Cr} 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 TN 相比存在明显差异. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的浓度平

均值在洪季期间明显低于枯季, 但两者的洪季浓度与 SS 一样变化剧烈, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的最大值分别是最小值的 36.95 和 33.25 倍. 上述各污染物浓度在洪、枯季的变化特点主要与流域内洪、枯季水量差异及各污染物的来源差异有关. 对于 SS, 由于淡水河流域的 SS 来源主要还是以陆面泥沙为主, 也就是基本以非点源为主要来源, 所以 SS 在洪季浓度平均值大于枯季, 且浓度变化剧烈; COD_{Cr} 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均存在点源排放, 其中, COD_{Cr} 有工业和生活来源, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 则主要来自污水处理厂排放, 但 COD_{Cr} 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 依然表现出洪季平均浓度大于枯季的特点, 非点源对两者的贡献相当重要. 淡水河流域 COD_{Cr} 的非点源污染的可能来源包括流域中土壤有机质、植物残渣及陆面垃圾, 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的来源则主要为土壤中本身含有的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及化肥; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TP 在枯季的平均浓度高于洪季, 这表明淡水河流域内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TP 的点源贡献十分重要; 在枯季时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度占 TN 的 74.8%, 而洪季时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度占 TN 的比例为 58%, 这表明洪季 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和有机氮对 TN 的贡献有所增加.

表 2 淡水河流域 2010 年水质监测结果统计信息

Table 2 Water quality statistical information of Danshui catchment in 2010

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

采样季节	数据类型	SS	COD_{Cr}	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	TN	TP
枯季	最小值	9.000	13.000	10.752	0.175	12.717	0.426
	最大值	52.000	38.700	23.097	4.423	35.809	1.916
	平均值	21.412	22.217	15.731	1.106	21.022	0.976
	标准偏差	10.779	4.253	2.486	0.925	5.471	0.287
洪季	最小值	1.000	5.000	0.500	0.053	2.489	0.056
	最大值	497.000	45.700	18.476	7.419	64.478	1.862
	平均值	30.568	15.967	6.372	1.695	10.982	0.467
	标准偏差	63.177	5.293	3.615	1.189	5.810	0.233

注: 洪季是指每年的 4 至 9 月, 枯季是指每年的 1 至 3 月及 10 至 12 月.

3.3 淡水河流域污染物通量计算

参考前人同类研究(Chang *et al.*, 2008; Kawara *et al.*, 1996), 本研究通过对淡水河流域出口污染物通量站大量的同步水文、水质数据进行回归分析, 建立径流量与各污染物通量之间定量关系的统计模型, 采用的回归模型如公式(1)所示.

$$\frac{W_i}{A} = a \left(\frac{Q_i}{A} \right)^b \quad (1)$$

式中, W_i 为流域中的各类污染物的负荷 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$), A 为流域面积 (km^2), Q_i 为流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), a 和 b 为对应各类污染物待求的常量参数. 淡水河流域中对应

各类污染物的统计模型参数回归结果见表 3.

表 3 淡水河流域污染物通量模型回归分析结果

Table 3 Regression result of the pollutant flux model in the Danshui catchment

污染物	a	b	R^2	n
SS	0.0021	1.6469	0.79	498
COD_{Cr}	0.0051	1.1981	0.94	389
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.0164	0.8083	0.57	508
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.0033	0.8847	0.78	503
TN	0.0006	1.4445	0.72	498
TP	0.0005	1.0143	0.77	498

注: 以上统计结果均为 $p < 0.001$.

基于 HSPF 的径流量模拟结果及公式 (1) 所示的污染物通量模型,对淡水河流域各类污染物的年输出通量及年内通量变化过程进行计算,结果如图 5 及表 4 所示.从图 5 可以看出,除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 通量的计算值与实测值拟合程度较低(R^2 分别为 0.28

和 0.31),其余污染物通量的计算值与实测值拟合程度相对较好, R^2 均大于 0.5.其中,以 SS 和 TP 通量的计算值与实测值拟合程度最好, R^2 分别为 0.63 和 0.61.从淡水河流域出口月通量及年通量的计算结果可以看出,淡水河流域各类污染物在汛期的输

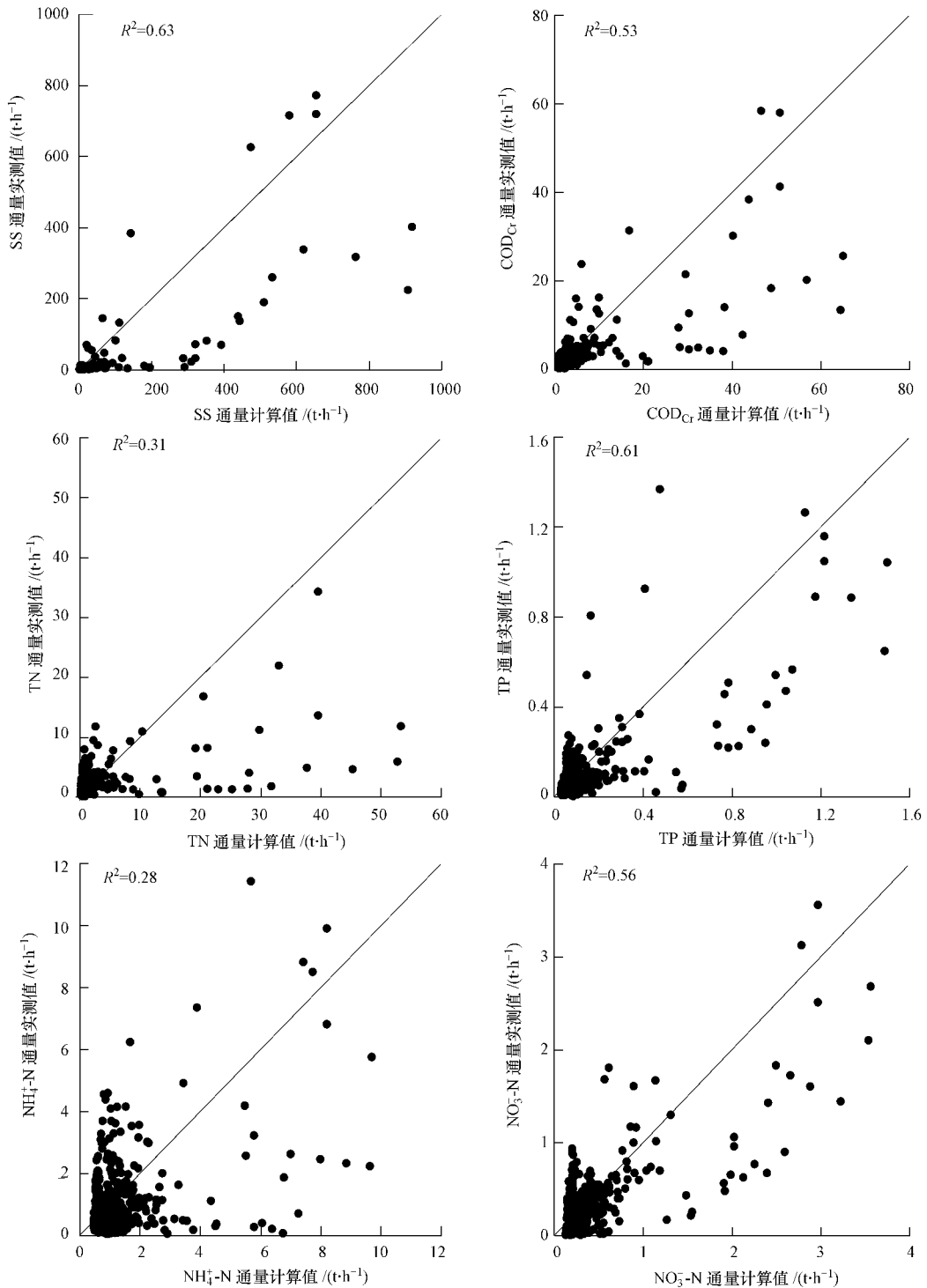


图 5 淡水河流域污染物通量计算回归模型计算值与实测值散点图

Fig. 5 Scatter plot between simulated and observed pollutant fluxes

表 4 淡水河流域各类污染物 2010 年月通量计算结果

Table 4 Estimated monthly pollutant fluxes in the Danshui catchment

月份	月通量/(t·月 ⁻¹)					
	SS	COD _{Cr}	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TP
1	2038.10	694.39	409.36	114.80	239.76	30.56
2	2005.54	641.50	369.29	103.86	227.99	27.84
3	1507.60	557.55	353.00	97.62	184.03	25.38
4	2488.29	752.27	415.98	117.83	275.51	31.99
5	5504.53	1329.46	610.14	179.11	550.25	51.72
6	34587.64	4475.66	1262.06	405.40	2594.07	137.26
7	28679.59	3974.30	1207.23	382.34	2208.24	126.26
8	9891.83	2150.77	868.86	262.17	948.46	79.10
9	52544.03	6171.24	1595.07	521.60	3770.63	181.84
10	9839.58	1974.87	793.29	238.78	899.39	72.01
11	3003.06	917.17	489.76	140.06	336.52	38.54
12	1927.23	670.82	401.12	112.20	229.09	29.74
年总量	154017.00	24309.99	8775.17	2675.77	12463.96	832.25
汛期比例	86.81%	77.56%	67.91%	69.83%	83.02%	73.08%

注:汛期指 4—9 月,汛期比例是指 4—9 月间污染物通量总和占全年污染物通量总和的比例。

出通量占全年通量总和均在 60% 以上。在各污染物中,SS 和 TN 在汛期的通量占全年通量比例较高,分别是 86.81% 和 83.02%; COD_{Cr} 和 TP 汛期输出通量所占比例略低于 SS 和 TN,分别为 77.56% 和 73.08%; NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 汛期通量占全年通量比例较低,分别为 67.91% 和 69.83%。

4 讨论 (Discussion)

本研究中利用分布式水文模型结合污染物通量回归模型对淡水河流域的各类污染物通量进行计算,其年内季节分布与国内外非点源研究(胡远安等,2004;高扬等,2008;Goolsby *et al.*,2000;Sherstha *et al.*,2008)的结果较为类似,反映出淡水河流域在洪季由于降雨集中,全年污染物输出通量主要由汛期通量构成的特征,但与其它同样应用水文模型结合通量回归模型的研究相比,淡水河流域通量计算的精度还有一定的差距。本研究中计算精度主要受所选用的回归方程及淡水河流域的污染特征所影响。本研究所采用的回归方程为指数回归方程,而在国外同类研究中,主要将指数回归方程用在小流域径流量和污染物通量之间的统计分析上,回归方程的拟合精度及计算结果与实测值的吻合程度都较高。例如,Chang 等(2008)在台湾曾文水库上游的一个子流域(流域面积 13.7 km²)应用指数回归方程对该流域的径流量与各类污染物通量进行回归分析。与 Chang 等的研究结果(NH₄⁺-N

回归方程的 $R^2 = 0.55$) 相比,本研究的结果也存在 NH₄⁺-N 回归方程拟合程度较差 ($R^2 = 0.57$) 的情况。但除 COD_{Cr} 外,Chang 等研究中其余污染物的回归方程拟合程度 (R^2 均大于 0.8) 均比本研究高。这可能是由于 Chang 等的研究区域较小,径流量与水质及污染物通量之间的响应关系较好;此外,Chang 等的研究区域主要为林地,受人类活动干扰程度较小。应该指出的是,虽然淡水河流域面积大 (1015.32 km²),对通量与径流量之间的回归分析会有影响,但并不等于公式(1)所示的指数回归方程不适用于淡水河这类中型流域,因为淡水河上游人类活动干扰程度高,对回归分析结果的影响也不可忽视。如果公式(1)用于人类活动相对较低,但空间尺度与淡水河流域相近的流域,回归分析效果可能会更理想。另外,目前虽然用于回归分析的同步水文、水质数据样本数量较大 ($n = 389 \sim 508$),但由于人工采样无法对每一次降雨过程,特别是特大暴雨过程进行全程的覆盖,目前的水质样本中相当一部分还是属于非降雨事件期间的采样。缺乏更多、更完整暴雨过程水质数据的情况,也会对回归分析的结果准确性有负面影响。

淡水河流域的季节及年度通量结果(表 4)显示在淡水河流域非点源污染占主导地位,在考虑到淡水河流域林地及耕地、旱地等透水下垫面占流域总面积近 80% 的前提下,这是一个较为合理的结果。但应该指出的是,由于 NH₄⁺-N 及 TN 通量的计算值

与实测值之间拟合效果较差,导致其通量计算结果不太合理(非汛期 NH_4^+-N 的通量反而大于 TN),因此 NH_4^+-N 和 TN 汛期通量占年通量的比例并不一定反映实际情况。 NH_4^+-N 和 TN 计算值与实测值之间拟合效果不理想,可能是由于公式(1)所示的指数回归方程不适用于淡水河的这两类污染物。指数回归方程只是建立起径流量与污染物通量之间的关系,但对一些受人类活动影响较大的污染物而言(如与生活源排放有关的各类营养盐)就要建立起包括更多因素与污染物通量之间关系的方程,而不仅仅是径流量与污染物通量之间关系。例如,国外一些研究人员所用的 7 参数自然对数回归方程,就是建立起污染物通量与流量、污染物浓度、时间、浓度季节变化、季节性随机误差等之间关系的通量计算方程(Cohn *et al.*, 1992, Goolsby *et al.*, 2000, Sherstha *et al.*, 2008)。Smith 等(1997)及 Roberts 等(2009; 2010)所用的 SPARROW 模型则更为复杂,该模型通过建立污染物通量与土地利用类型、坡度、坡长、河网密度、人口、化肥施用量及各类河道水库反应参数等因素之间的回归方程,来对污染物通量进行计算。

5 结论(Conclusions)

本研究应用分布式水文模型 HSPF 结合回归模型对广东省东江流域中淡水河流域的非点源负荷进行计算。研究结果显示,模型较好地再现了 SS 、 COD_{Cr} 、 NO_3^--N 及 TP 在 2010 年内的通量随时间变化过程。研究结果表明,淡水河流域的 SS 、 COD_{Cr} 、 NO_3^--N 和 TP 在汛期的通量对年通量的贡献十分显著,分别占年通量的 86.81%、77.56%、69.83% 和 73.08%。本研究中所用回归方程只考虑了径流量与污染物通量之间的关系,并没有更多地考虑与人类活动相关的因素, NH_4^+-N 和 TN 的计算结果与实测值之间存在较大差异,可能是由于这两类污染物与人类活动的点源排放关系密切有关。本研究所利用的分布式水文模型结合污染物通量与流量回归模型的非点源负荷估算方法,适用于没有常规水文站点及流域内人类活动相关数据(污染源等)不易获取的流域进行污染负荷计算。

致谢(Acknowledgement): 本研究中使用的土地利用类型图及土壤类型图为中国科学院数据共享平台上的部分共享数据,其中土地利用类型图由中国科学院地理科学与资源研究所的地球科学数据共享平台提供,土壤类型图由中国科学院

南京土壤研究所提供,在此对上述单位表示诚挚的谢意。

责任作者简介: 曾凡棠(1963—),男,研究员,主要研究方向为水环境模拟与水污染控制,发表论文 37 篇。E-mail: zengfantang@scies.org.

参考文献(Reference):

- Bicknell B R, Imhoff J C, Kittle J L, *et al.* 2001. HSPF Version 12 User's Manual [M]. Mountain View, California: Aqua Terra Consultants
- Broad S T, Corkrey R. 2011. Estimating annual generation rates of total P and total N for different land uses in Tasmania, Australia [J]. *Journal of Environmental Management* 92: 1609–1617
- Chang C H, Wen C G, Huang C H, *et al.* 2008. Nonpoint source pollution loading from an undistributed tropic forest area [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* 146: 113–126
- Cohn T A, Caulder D L, Gilroy E J, *et al.* 1992. The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: An empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay [J]. *Water Resources Research* 29(9): 2353–2363
- Filoso S, Vallino J, Hopkinson C, *et al.* 2004. Modeling nitrogen transport in the Ipswich river basin, Massachusetts, using a hydrological simulation program in fortran (HSPF) [J]. *Journal of the American Water Resources Association* 40(5): 1365–1384
- 傅大放, 石峻青, 李贺. 2009. 高速公路雨水径流重金属污染初期效应 [J]. *环境科学学报* 29(8): 1672–1677
- Fu D F, Shi J Q, Li H. 2009. First flush analysis of heavy metals in expressway stormwater runoff [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(8): 1672–1677 (in Chinese)
- 高扬, 朱波, 周培, 等. 2008. 紫色土坡地氮素和磷素非点源输出的人工模拟研究 [J]. *农业环境科学学报* 27(4): 1371–1376
- Gao Y, Zhu B, Zhou P, *et al.* 2008. Non-point source export of nitrogen and phosphorus from slope crop of purple soil with simulated rainfall method [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 27(4): 1371–1376 (in Chinese)
- 胡远安, 程声通, 贾海峰. 2004. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律 [J]. *环境科学* 25(6): 108–112
- Hu Y A, Cheng S T, Jia H F. 2004. Regular pattern of non-point source pollutants losses in Luxi Watershed [J]. *Environmental Science*, 25(6): 108–112 (in Chinese)
- Goolsby D A, Battaglin W A, Aulenbach B T, *et al.* 2000. Nitrogen flux and sources in the Mississippi River Basin [J]. *The Science of the Total Environment* 248: 75–86
- Huang J, Hong H. 2010. Comparative study of two models to simulate diffuse nitrogen and phosphorus pollution in a medium-sized watershed, southeast China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 86: 387–394
- 江涛, 张晓磊, 陈晓宏, 等. 2009. 东江中上游主要控制断面水质变化特征 [J]. *湖泊科学* 21(6): 873–878
- Jiang T, Zhang X L, Chen X H, *et al.* 2009. The characteristics of water quality change for the main control sections in the middle and

- upper reaches of East River[J]. *Journal of Lake Science* ,21(6) : 873-878(in Chinese)
- Kawara O , Hirayma K , Kunimatsu T. 1996. A study on pollution loads from the forest and rice paddy fields [J]. *Water Science and Technology* 33: 159-165
- Liang T , Wang S , Cao H , *et al.* 2008. Estimation of ammonia nitrogen load from nonpoint sources in the Xitiaio River catchment , China [J]. *Journal of Environmental Sciences* 20: 1195-1201
- Lin J , Xu H , Cudaback C , *et al.* 2007. Inter-annual variability of hypoxic conditions in a shallow estuary [J]. *Journal of Marine Systems* 73(1/2) : 169-184
- Roberts A D , Prince S D. 2010. Effects of urban and non-urban land cover on nitrogen and phosphorus runoff to Chesapeake Bay [J]. *Ecological Indicators* 10: 459-474
- Roberts A D , Prince S D , Jantz C A , *et al.* 2009. Effects of projected future urban land cover on nitrogen and phosphorus runoff to Chesapeake Bay [J]. *Ecological Engineering* 35: 1758-1772
- Sanders R J , Jickells T , Malcolm S , *et al.* 1997. Nutrient fluxes through the Humber estuary [J]. *Journal of Sea Research* 37: 3-23
- Sherstha S , Kazama F , Newham L T H. 2008. A framework for estimating pollutant export coefficients from long-term in-stream water quality monitoring data [J]. *Environmental Modelling & Software* , 23: 182-194
- Smith R A , Schwarz G E , Alexander R B. 1997. Regional interpretation of water-quality monitoring data [J]. *Water Resources Research* 33 (12) : 2781-2798
- Ullrich A , Volk M. 2009. Application of the soil and water assessment tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity [J]. *Agricultural Water Management* 96: 1207-1217
- Yoon S W , Chung S W , Oh D G , *et al.* 2010. Monitoring of non-point source pollutants load from a mixed forest land use [J]. *Journal of Environmental Sciences* 22(6) : 801-805
- Zhang H , Li S. 2010. Effects of physical and biochemical processes on the dissolved oxygen budget for the Pearl River Estuary during summer [J]. *Journal of Marine Systems* 79: 65-88
- 张恒 , 曾凡棠 , 房怀阳 , 等. 2011. 连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响 [J]. *环境科学学报* , 31(5) : 927-934
- Zhang H , Zeng F T , Fang H Y , *et al.* 2011. Impact of consecutive rainfall on non-point source pollution in the Danshui River catchment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* , 31(5) : 927-934(in Chinese)