

水源区河流非点源污染物入河量计算的水质方程反演方法

沈晔娜¹, 吕军^{1,2*}, 陈军华¹, 陈丁江¹, 史一鸣³

(1. 浙江大学环境与资源学院资源科学系, 杭州 310029; 2. 浙江大学污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 杭州 310029; 3. 浙江省亚热带土壤与植物营养重点实验室, 杭州 310029)

摘要:以水质一维流方程为基础,建立了水源地区非点源污染物入河量计算的反演模型;计算了浙江省湖州市老虎潭水库水源地区各条支流的非点源污染物入河量;并通过实测水文水质参数的统计,采用 Monte Carlo 模拟方法,分析了模型各输入参数的敏感性.由于该模型所有敏感参数都可以实测获得,避免了关键参数取值的人为主观因素的影响,保证了非点源污染过程定量分析的客观性;该模型在计算非点源污染物入河量时不受时间的限制,可以根据研究区域的水文水质监测频率计算任意时段内的非点源污染物入河量.结果表明,该水源区所有溪流中的氮、磷污染物负荷量都与溪流流量呈极显著正相关($r > 0.90$, $p < 0.01$),因此,丰水期是非点源污染物入河的集中期;对输入参数的敏感性分析显示,对模型输出结果影响最大的是溪流的流量,其次是段末浓度和背景浓度,综合降解系数和流速的影响较小.

关键词:水质方程;反演模型;不确定性分析;非点源污染;入河量

中图分类号:X143; X131.2 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)08-4768-07

Inversion Formula of One-dimensional Water Quality Equation for the Export Loads of Nonpoint Sources Pollution in Headwater Area

SHEN Ye-na¹, LÜ Jun^{1,2}, CHEN Jun-hua¹, CHEN Ding-jiang¹, SHI Yi-ming³

(1. Department of Natural Resources, College of Environmental Science and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Environment Remediation and Ecological Health, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, Hangzhou 310029, China)

Abstract:An inversion formula for the export loads of nonpoint sources pollution in headwater area was established based on one-dimensional water quality equation, and it was used to calculate the pollution loads for tributaries in the headwater catchment of Laohutan Reservoir, in Huzhou City, Zhejiang Province of China. Monte Carlo method was adopted to determine the sensitivity about each input parameter in the inversion formula. Because each sensitive parameter can be measured directly in the inversion formula, so that this approach can decreased calculation error, which is often caused by the parameter estimation. Furthermore, the inversion formula can be adopted to calculate pollution loading on any time scale. Monthly nonpoint sources pollution export loads in 2007 were calculated by the model in the research catchment. Results showed that pollution loads in stream were significantly positive related with flow rates ($r > 0.90$, $p < 0.01$), and the flow rate was the most sensitive factor in the model, followed by the nutrient concentration and background concentration at the stream end. While, comprehensive degradation coefficient and flow velocity contributed very little influence to the model uncertainty.

Key words:water quality equation; inversion formula model; uncertainty analysis; nonpoint sources pollution; export load

在点源污染逐步得到控制以后,非点源污染越来越成为水环境问题的焦点^[1-3];而区域或河段的非点源污染物入河量估算,是实行非点源污染控制的基础.由于非点源污染发生的时空不确定性、污染物迁移过程的高度非线性和多污染源的复合污染特性,使得直接监测非点源污染物的入河量、进而建立污染物入河量和水质响应关系困难重重,并已经成为非点源污染控制研究进展缓慢的重要原因.流域非点源污染物入河量的估算已有很多模型,如机制性模型 ANSWERS^[4]、GLEAMS^[5]、AGNPS^[6]、SWAT^[7]等.尽管这些模型具有很强的分析大尺度

污染物迁移转化过程的功能,但是应用这些建立在物理机制和大量经验关系基础上的模型,需要太多的参数和数据进行校正,严重限制了这些模型在建模区域外的有效推广和应用.

输出系数法^[8]因其明确的物理意义和简洁的表达形式,被广泛地应用于估算不同非点源污染源

收稿日期:2009-10-27;修订日期:2009-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(40571070);江苏省科学技术厅计划项目(BK2007740)

作者简介:沈晔娜(1981~),女,博士,主要研究方向为流域水资源与水质污染控制,E-mail:shenyena@tom.com

* 通讯联系人,E-mail:jlu@zju.edu.cn

污染物的入河负荷^[9-13]。但是,由于确定不同生态环境条件下各种污染源污染物的入河系数非常困难,现在绝大多数的此类研究中,都采用了从文献或其它人的工作中“借用”入河系数的方法,从而导致了严重的主观因素的影响和干扰,也成为该方法成功应用的致命弱点。此外,输出系数法给出的是污染物入河量的年平均值,不能提供短期内如一次降雨事件或一个短的水文周期的非点源污染物入河量,这给非点源污染的分期控制带来很大的难度,也很难建立真正有效的非点源污染控制的具体实施方案。近来也有学者提出了以水体污染物平均浓度估算非点源污染负荷的方法^[14],并用于黄河支流流域非点源污染物排放估算^[15];该方法避免了污染物产生迁移等过程参数的选择,但同样只能估算污染物入河量的年平均值。

本研究基于水质一维流方程建立了水源区非点源污染物入河量计算的反演模型,根据流域出口断面的实测水质浓度及流量、流速和污染物在流过程中的降解速率等参数反演非点源污染物的入河量,计算过程中避免了人为确定参数的误差。同时,该模型的应用也不受研究区的土地利用类型、农业生产、水文气象、社会经济等状况的影响,适用于符合水质一维流模型的所有河流,且能获取任意时段内的非点源污染物入河量,可用于研究单次降雨事件过程中非点源污染物的入河量问题。

1 模型与方法

1.1 反演模型

《饮用水水源保护区划分技术规范》^[16]规定,山区中型水库入库河流上溯3 000 m的汇水区域为二级保护区,二级保护区外的汇水区域为准保护区。据此,将发源于二级保护区和准保护区内的河流即入库断面以上的河流定义为源头溪流段,河流入库断面即为段末,河流的源头即为段首。根据质量守恒原理,河流段末水质一维流方程可表示为:

$$c_E = c_0 \exp\left(-K \frac{x}{u_x}\right) + s^n \frac{\left[1 - \exp\left(-K \frac{x}{u_x}\right)\right]}{K \frac{x}{u_x}} \quad (1)$$

式中, c_E 为段末污染物浓度, c_0 为段首污染物浓度, x 为流方向的距离(河段长度), u_x 为断面平均流速, K 为污染物衰减速度常数(综合降解系数), s^n 为单位时间单位水体非点源污染物增量。当河流流量为 Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),在时间 t 内,污染物负荷量(kg)为

$c_E Q t$,而在源头溪流区,溪流源头没有流量($Q_0 = 0$)。源头溪流区非点源污染 s^n 可以分为两类:①背景污染负荷 $c_b Q t$,包括进入河流的泥沙所携带的营养物质和大气沉降等带来的营养物质背景值;②进入河流的非点源污染物负荷量 L^n ,包括沿河排入水体的农村生活污染、分散的畜禽养殖污染和农业生产污染;同时,假设沿河还可能有 m 个稳定排放的点源污染,排污口分别在 x_i 处,进入河流的污染物排放量为 L_i^p 。则由式(1)可得源头溪流河段污染物负荷方程:

$$c_E Q t = \frac{c_b Q t + L^n}{K \frac{x}{u_x}} \left[1 - \exp\left(-K \frac{x}{u_x}\right)\right] + \sum_{i=1}^m L_i^p \left[\exp\left(-K \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{u_{xi}}\right)\right] \quad (2)$$

因此,源头溪流地区非点源污染物入河量可以表示为:

$$L^n = \left(c_E Q t - \sum_{i=1}^m L_i^p \left[\exp\left(-K \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{u_{xi}}\right)\right] \right) \cdot \frac{K \frac{x}{u_x}}{1 - \exp\left(-K \frac{x}{u_x}\right)} - c_b Q t \quad (3)$$

该模型以实测污染物浓度为基础,用描述河流中污染物迁移转化过程机理的方程求解任意时段内非点源污染物的入河量,解决了以往只能获取非点源污染物年入河量的问题。

1.2 河流污染物综合降解系数的率定

由于水温、水流紊动等水文水力学条件对污染物在河流中的降解影响甚大,文中将实验法和经验公式法相结合对污染物综合降解系数 K 值进行率定。现场采集原水样,在实验室条件下(20°C 、静态水体)测定各污染物综合降解系数,通过公式(4)进行流速、河深、河流坡度、水温等各种有关因素的校正^[17]:

$$K = \left(K_{20} + \alpha \frac{u}{h} \right) 1.047^{t-20} \quad (4)$$

式中, K_{20} 为实验室条件下综合降解系数(d^{-1}), α 为河床活度系数, u 为河流流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), h 为河流水深(m), t 为实际水温($^\circ\text{C}$)。

1.3 参数不确定性分析

变异和不确定性是所有自然过程所固有的特征。通过不确定性分析,不仅可以较客观地评价模型的适用性和可靠性,而且对模型的参数、变量和模型结构的改进具有指导性的意义。目前,不确定分析

的方法有蒙特卡罗法、一阶误差分析、灵敏度分析法等. 其中蒙特卡罗法概念简单、理论可靠、适应性广、计算方法成熟,用于不确定分析几乎没有任何限制^[18]. 此外,结合拉丁超立方(LHS)取样的蒙特卡罗方法,可以大大减少随机抽样的抽样次数,计算效率可提高10倍左右^[19].

本研究用@risk软件,结合拉丁超立方抽样的蒙特卡罗方法,对所建立的水源区非点源污染物水质方程反演模型[式(3)]进行不确定分析. 分析结果用Sperman等级相关系数($\rho_{x,y}$)表征模型输出结果和输入参数之间的敏感性,该相关系数计算如下^[20]:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\left[\sum_{k=1}^m (x_k - \bar{x})^2 \sum_{k=1}^m (y_k - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

式中, m 是抽样次数或模拟次数, x 和 y 分别是输入

参数和输出结果的排序值. $\rho_{x,y}$ 的取值范围在 $-1 \sim 1$ 之间,一般来说,当 $\rho_{x,y}$ 的绝对值 >0.5 时说明输出结果和输入参数之间存在着本质的相关关系.

1.4 研究区概况

老虎潭水库位于浙江省湖州市,集水区总面积110.0 km²(含库区),主要有庄上水、大陈水、埭溪3条直接入库的山溪性河流,其河长分别为6.33、7.47和14.92 km,河流平均坡降为10.5‰,相应的子流域集水面积分别为23.22、13.48、67.97 km². 3个子流域内共有14个村庄,2007年总人口15592人. 2007年3个子流域内的非点源污染物投排放量通过实地调查得到,点源污染物投排放量由当地环保部门提供(表1),其中点源污染的投排量很小,除大陈水流域5.18%的总氮投排放量来自点源外,其余都可以忽略;非点源污染主要包括农村生活、畜禽养殖、水田、旱地、园地和林地等.

表1 老虎潭水库集水区2007年污染物投排放情况/kg·a⁻¹

Table 1 Contamination yields from different sources for each sub-catchment in Laohutan Reservoir watershed, 2007/kg·a⁻¹

指标	子流域	点源污染	非点源污染	合计	点源污染比例/%	非点源污染比例/%
TN	庄上水	0	77 150	77 150	0.00	100.00
	大陈水	1 435	26 245	27 680	5.18	94.82
	埭溪	1 738	335 881	337 619	0.51	99.49
TP	庄上水	0	18 342	18 342	0.00	100.00
	大陈水	52	7 334	7 386	0.70	99.30
	埭溪	56	82 576	82 632	0.07	99.93

1.5 水质监测及数据收集

本研究以月为单位,在2007年1~12月,对老虎潭水库集水区3支流进行定期水质监测和分析,并根据流域实际情况,在各支流的段首和段末共设置6个水质监测断面. 段首水质监测断面为各支流的源头,不受人为污染的影响,段末水质监测断面为各支流入库前的断面. 水质指标TN用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法^[21]测定,TP用钼酸铵分光光度法^[22]测定. 每条支流最上游无人为污染的监测断面的实测水质浓度作为环境背景浓度(c_b /mg·L⁻¹),取其全年平均值,根据 $L_b = c_b Q t$ 计算各污染物的环境背景负荷. 根据测定结果,TN、TP的环境背景浓度年内变化不大,平均值分别为(1.260 ± 0.401)和(0.027 ± 0.008) mg·L⁻¹. 2007年3支流段末日平均流量 Q (m³·s⁻¹),根据当地水文监测站提供的干流流量经3支流集水面积比例推算得到,河流断面流速为实测流速(Area velocity flow module, ISCO2150, Isco, Inc. US).

2 结果与讨论

2.1 污染物综合降解系数

20℃静态水体的实验室条件下,河流TN和TP的综合降解系数分别为0.020 d⁻¹和0.019 d⁻¹,河床活度系数取0.60^[17],经式(4)校正后不同时期TN和TP的综合降解系数见表2. 综合降解系数随水温、流速、流量等水文水力条件的变化在不同的月份表现出较大的变异.

2.2 河流水质及流域污染物输出负荷

2007年水质监测数据显示,庄上水、大陈水、埭溪3支流TN的年平均浓度均超过了2.0 mg·L⁻¹,分别为(2.21 ± 0.49)、(2.51 ± 0.26)和(2.32 ± 0.44) mg·L⁻¹,TP的年平均浓度在0.1 mg·L⁻¹左右波动,其年平均浓度分别为(0.09 ± 0.03)、(0.11 ± 0.03)和(0.07 ± 0.03) mg·L⁻¹,TN和TP浓度在月际间波动较大. 由于3个子流域有着相似的社会经济状况、耕作种植制度、水文气候条

表 2 校正后的 TN、TP 综合降解系数
Table 2 Validated comprehensive degradation coefficients

指标	子流域	K/d^{-1}												平均值 \pm 误差
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
TN	庄上水	0.121	0.128	0.154	0.207	0.264	0.316	0.383	0.384	0.297	0.226	0.184	0.139	0.257 \pm 0.102
	大陈水	0.122	0.129	0.156	0.209	0.267	0.319	0.387	0.388	0.299	0.228	0.186	0.140	0.234 \pm 0.086
	埭溪	0.119	0.125	0.151	0.203	0.259	0.309	0.375	0.376	0.291	0.221	0.180	0.136	0.247 \pm 0.101
TP	庄上水	0.120	0.127	0.154	0.206	0.263	0.314	0.381	0.382	0.295	0.225	0.183	0.138	0.256 \pm 0.101
	大陈水	0.122	0.129	0.155	0.208	0.266	0.318	0.385	0.386	0.298	0.227	0.185	0.140	0.233 \pm 0.086
	埭溪	0.118	0.125	0.151	0.202	0.258	0.308	0.374	0.375	0.290	0.220	0.180	0.136	0.246 \pm 0.101

件和污染物环境背景值,因此,溪流中污染物的浓度主要取决于各污染物在相应流域内的投、排放量和它们的入河率,即单位污染物投排放量随径流的入河比例。

流域污染物输出负荷是指经河流输出河段末的污染物总量,也就是段末浓度实测值、段末流量和时间的乘积。经计算,2007年庄上水、大陈水、埭溪3个子流域 TN 的年输出负荷分别为 24.45、16.42

和 77.78 $t \cdot a^{-1}$, TP 分别为 1.06、0.75、2.62 $t \cdot a^{-1}$ 。老虎潭水库集水区污染物输出负荷基本上都来自非点源污染。非点源污染的产生和迁移与降雨、产汇流过程等水文因素直接相关,是非点源污染物产生和迁移的主要驱动因子^[13,23]。2007年老虎潭水库集水区各子流域 TN 和 TP 的负荷均与径流量呈极显著的正相关关系($p < 0.01$, $n = 12$,图 1),表现出非点源污染区域污染物输出负荷的典型特征。

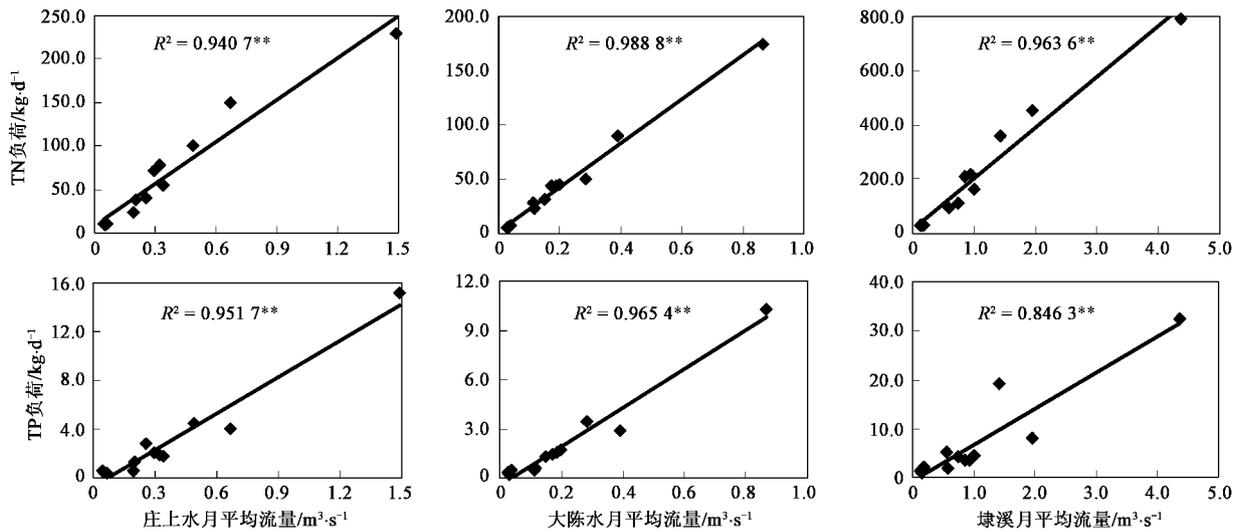


图 1 各支流氮磷负荷和流量的关系

Fig. 1 Relationship between TN, TP loads and flow rates for each tributary

2.3 非点源污染物入河量

非点源污染物入河量是指从集水区陆域随径流进入河流的污染物总量。应用本研究建立的水源区非点源污染物入河量反演模型,老虎潭水库集水区3个子流域2007年各月 TN 和 TP 的非点源污染物入河量计算结果如图 2 所示。可以看出,各子流域月与月之间的污染物入河量变异极大,庄上水、大陈水、埭溪子流域非点源污染 TN 的月入河量分别为 118.50 ~ 2860.38、1.52 ~ 2477.57 和 413.02 ~ 10086.55 $kg \cdot 月^{-1}$, TP 分别为 5.08 ~ 359.11、1.87

~ 254.84 和 18.41 ~ 697.71 $kg \cdot 月^{-1}$,其占段末负荷的比例分别为 16.76% ~ 63.92%、29.28% ~ 53.83%、32.43% ~ 47.33% 和 28.95% ~ 86.76%、28.50% ~ 84.35%、33.10% ~ 94.14%。3 个子流域非点源污染 TN 的年入河量分别为 11.37、7.79 和 38.17 $t \cdot a^{-1}$, TP 的年入河量分别为 0.79、0.57、1.81 $t \cdot a^{-1}$,其占段末负荷的比例分别为 46.50%、47.44%、49.07% 和 74.53%、76.00%、69.08%。TN、TP 的非点源污染入河量均随流量的增加而增加(图 3),且两者之间存在极显著正相关关系($p <$

0.01) 和段末负荷随流量的变化趋势一致. 丰水期 (3 月 9、10 月) 产生的 TN、TP 非点源污染入河量占了年入河总量的 57% 以上, 其中大陈水和埭溪 TP 的入河量分别占到全年 TP 入河总量的 71.00% 和 72.91%. 枯水期 (8 月, 11、12 月) 产生的非点源污染物入河量除埭溪 TP 占全年入河总量的 5.99% 外, 其余都小于 5%, 而大陈水 TN 枯水期的入河量仅占年入河总量的 0.93%. 很显然, 丰水期是控制非点源污染物入河量的关键时期.

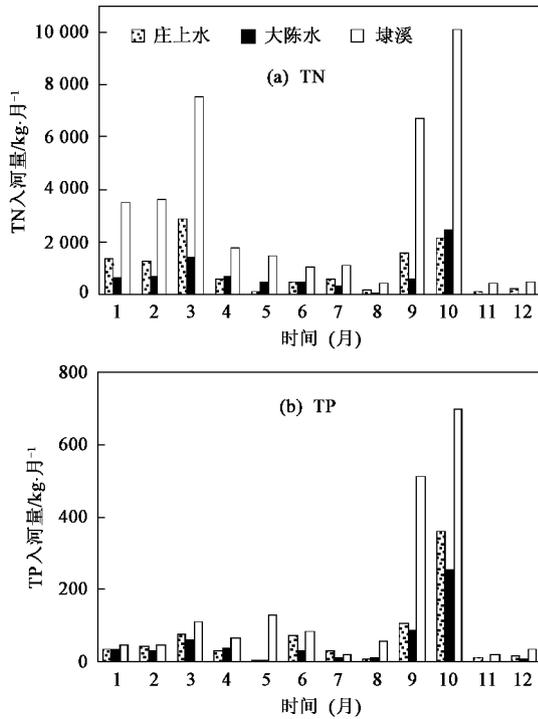


图 2 老虎潭水库集水区各子流域非点源氮磷入河量
Fig. 2 Nonpoint sources TN, TP export loads about each sub-catchment in Laohutan Reservoir

进一步比较各子流域溪流污染物年入河总量和年总排放量 (表 1) 发现, 尽管污染物年入河总量和总排放量随流域面积的增大而加大, 但单位非点源污染排放量所产生的污染物入河量比例则随子流域面积的增大而减小. 庄上水、大陈水、埭溪 3 个子流域非点源污染 TN 和 TP 的入河比例分别为 0.145 9、0.297 0、0.084 1 和 0.042 9、0.077 0、0.018 2. 该结果揭示了在相似的社会经济、自然环境、生活生产情况下, 河流段末污染物浓度随子流域面积增大而降低的变化趋势.

2.4 模型的不确定性分析

本研究以 TN 非点源污染入河量为例, 采用蒙

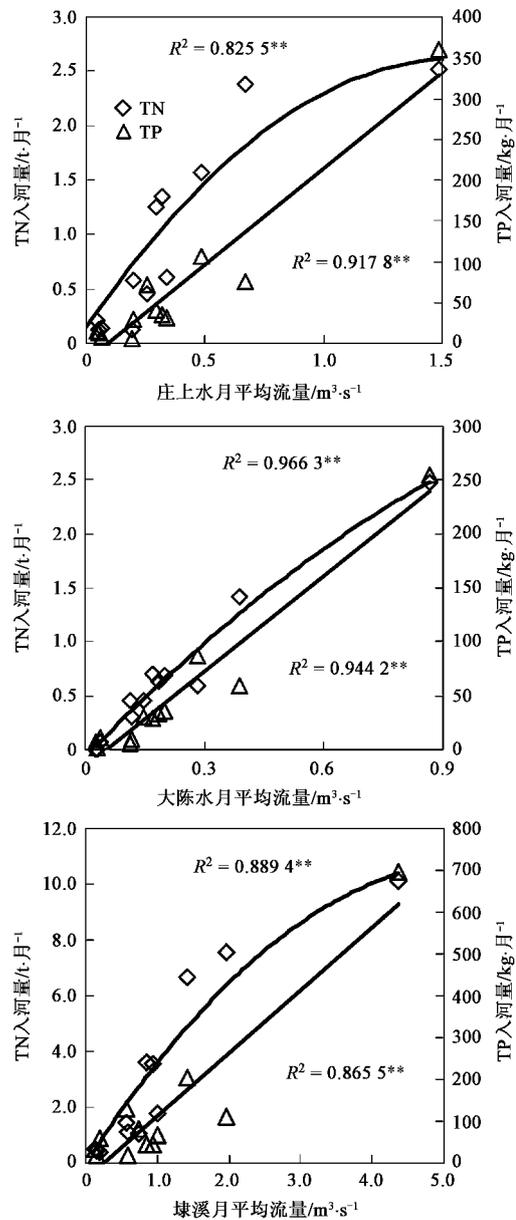


图 3 老虎潭水库集水区各子流域非点源氮磷入河量与流量关系

Fig. 3 Relationship between nonpoint sources TN, TP export amounts and flow rates about each sub-catchment in Laohutan Reservoir Watershed

特卡罗法对该模型中的各参数进行了不确定性分析. 根据 2007 年 12 个月的实测值, 用统计分析软件 SPSS16.0 对各输入参数进行 K-S 单样本检验, 结果表明 3 支流段末浓度、背景浓度、流量、流速和污染物综合降解系数均为正态分布. 由于点源排放比较稳定, 在模型中设定点源污染入河负荷按月平均分配, 为均匀分布函数, 并设定偏差为平均值的 $\pm 20\%$. 应用 @ risk 软件对庄上水、大陈水、埭溪的 TN 非点源污染入河量进行 5 000 次模拟抽样, 分析

模型各参数和变量的不确定性. 经蒙特卡罗模拟抽样和单样本与总体平均数假设检验, 结果表明, 3 个子流域 2007 年 12 个月的实测结果都为 5 000 次模拟结果的一个随机样本, 各子流域内 90% 的 TN 非点源污染入河量模拟值与实测计算同域, 表明了用结合拉丁超立方抽样的蒙特卡罗方法模拟非点源污染物入河量反演结果是可行的.

水源区非点源污染水质反演模型中各参数不确定性分析结果的龙卷风图如图 4. 结果表明, 在源头溪流地区, 对非点源污染物入河量反演模型 [式 (3)] 模拟结果影响最大的是流量, 即径流是影响非

点源污染产生的主要因子, 对非点源污染负荷有决定性作用, 也是模型能否真实反映研究区非点源污染物入河量实际情况的关键参数. 其次是段末浓度和背景浓度的影响, 同样对模型的模拟结果有着重要影响; 而流速和综合降解系数的影响很小. 污染物环境背景值 c_b 对模型的结果影响较大, 是因为水源地河流污染物浓度较低, 环境背景值所占比例较大的缘故. 综合降解系数对非点源污染物入河量的模拟结果影响较小, 是由于山区源头溪流河道较短, 水流滞留时间短, 而且污染物浓度相对较低, 河流自净作用相对较小.

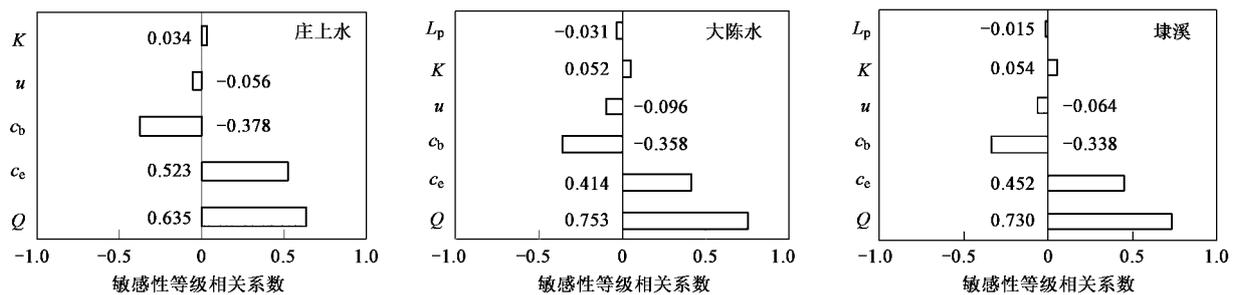


图 4 模型各参数的敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity analysis about different inputs about the model

3 结论

(1) 庄上水子流域非点源污染 TN 的月入河量为 $118.50 \sim 2\,860.38 \text{ kg} \cdot \text{月}^{-1}$, TP 为 $5.08 \sim 359.11 \text{ kg} \cdot \text{月}^{-1}$, 大陈水子流域非点源污染 TN 的月入河量为 $1.52 \sim 2\,477.57 \text{ kg} \cdot \text{月}^{-1}$, TP 为 $1.87 \sim 254.84 \text{ kg} \cdot \text{月}^{-1}$, 埭溪水子流域非点源污染 TN 的月入河量为 $413.02 \sim 10\,086.55 \text{ kg} \cdot \text{月}^{-1}$, TP 为 $18.41 \sim 697.71 \text{ kg} \cdot \text{月}^{-1}$. TN 和 TP 的非点源污染入河量和流量存在极显著正相关关系 ($p < 0.01$). 丰水期 (3 月、9、10 月) 是非点源污染入河的集中时期, TN、TP 的入河量占了年入河总量的 57% 以上, 其中大陈水和埭溪 TP 的入河量分别占到全年 TP 入河总量的 71.00% 和 72.91%.

(2) 基于水质一维流方程的非点源污染物入河量计算反演模型的优点是所有敏感参数都可以实测获得, 降低了以往此类模型中关键参数靠估计或“借用”带来的误差, 且在计算非点源污染物入河量时不受时间的限制, 可以根据研究区域的水文水质监测频率, 计算任意时段内的非点源污染物入河量.

(3) 结合拉丁超立方抽样的蒙特卡罗法对模型输入参数的敏感性分析显示, 在水源区应用水质方

程反演模型进行非点源污染物入河量的计算时, 对结果影响最大的是流量, 其次是段末浓度和背景浓度, 综合降解系数和流速的影响较小.

参考文献:

- [1] Tachibana H, Yamamoto K, Yoshizawa K, *et al.* Non-point pollution of Ishikari river, Hokkaido, Japan [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**:1-8.
- [2] Braskerud B C. Factors affecting nitrogen retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution [J]. *Ecological Engineering*, 2002, **18**:351-370.
- [3] Munafò M, Cecchi G, Baiocco F, *et al.* River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, **77**:93-98.
- [4] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning [J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, **23** (4):938-944.
- [5] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems [J]. *Transactions of ASAE* 1987, **30** (5):1403-1418.
- [6] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, *et al.* Agricultural non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, **44** (2):168-173.
- [7] Arnold J G, Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three

- Illinois watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **176**:57-77.
- [8] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **183**:323-349.
- [9] May L, House W A, Bowes M, *et al.* Seasonal export of phosphorus from a lowland catchment: upper River Cherwell in Oxfordshire, England [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **269**:117-130.
- [10] Wickham J D, Wade T G, Riitters K H, *et al.* Upstream-to-downstream changes in nutrient export risk [J]. *Landscape Ecology*, 2003, **18**:193-206.
- [11] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用 [J]. *水利学报*, 2004, **7**:40-45.
- [12] Zobrist J, Reichert P. Bayesian estimation of export coefficients from diffuse and point sources in Swiss watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **329**:207-223.
- [13] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于降雨和地形特征的输出系数模型改进及精度分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2008, **17**(2):306-309.
- [14] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用 [J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(4):397-400.
- [15] 韩凤朋, 郝纪勇, 王云强, 等. 黄河支流非点源污染物(N、P)排放量的估算 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(11):1893-1899.
- [16] HJ/T 338-2007, 饮用水水源保护区划分技术规范 [S].
- [17] 史晓新, 朱党生, 张建永. 现代水资源保护规划 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 101.
- [18] Beck M B. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty [J]. *Water Resources Research*, 1987, **23**(8):1393-1442.
- [19] Hamed M M. Impact of random variables probability distribution on public health risk assessment from contaminated soil [J]. *Journal of Soil Contamination*, 2000, **9**(2):99-117.
- [20] Cullen A C, Frey H C. Probabilistic Techniques in Exposure Assessment: A Handbook for Dealing with Variability and Uncertainty in Models and Inputs [M]. New York: Plenum Press, 1999.
- [21] GB 11894-89, 水质总氮的测定——碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 [S].
- [22] GB 11893-89, 水质总磷的测定——钼酸铵分光光度法 [S].
- [23] Hejzlar J, Vyhnanek V, Kopáček J, *et al.* Sources and transport of phosphorus in the vltava river basin (Czech republic) [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **33**(4-5):137-144.