# 非点源污染河流水环境容量的不确定性分析

陈丁江[1], 吕军[1,2*], 金培坚[1], 沈晔娜[1], 史一鸣[1], 龚冬琴[1]

(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)

**摘要**: 基于河流一维水环境容量计算模型和实测水文水质参数的统计分析, 应用 Monte Carlo 模拟方法, 分析模型各输入参数的灵敏度以及水环境容量值的概率分布, 建立了非点源污染河流水环境容量的分期不确定性分析方法. 本方法表达了由于获取的河流系统信息不确定性和非点源污染发生的随机性引起的水环境容量计算结果不确定性, 给出了不同水文期在不同可信度下的河流水环境容量, 为实现非点源污染的总量控制提供了可靠的基础. 应用本方法, 对长乐江的总氮水环境容量进行了不确定性分析. 结果表明, 根据水质控制目标, 枯水期、平水期、丰水期中 90% 可信度的总氮水环境容量分别为 487.9、949.8、1 392.8 kg·d$^{-1}$, 其中稀释容量是各水文期水环境容量的主要组成部分. 据此, 各水文期流域内的总氮现状入河量需削减1 258.3 ~ 3 591.2 kg·d$^{-1}$, 丰水期是削减量最大的时期. 不确定性分析方法计算得到的水环境容量是基于非点源污染河流水文水质状况的实际变化, 这相对于按某一设计流量来确定水环境容量的常规方法更为科学、合理, 拓展了水环境容量的研究思路和方法.

**关键词**: 水环境容量; 非点源污染; 不确定性; Monte Carlo 模拟; 河流; 总氮

**中图分类号**: X131.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2010)05-1215-05

# Uncertainty Analysis of Water Environmental Capacity in the Nonpoint Source Polluted River

CHEN Ding-jiang[1], LÜ Jun[1,2], JIN Pei-jian[1], SHEN Ye-na[1], SHI Yi-ming[1], GONG Dong-qin[1]

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

**Abstract**: Based on the one-dimension model for river water environmental capacity (WEC) and the statistical analysis of the measured hydrological and water quality variables, a uncertainty analysis method for the WEC in nonpoint source polluted river was developed, which included the sensitivity analysis for input parameters of the model and the probability distributions analysis for the WEC using Monte Carlo simulation approach. The method, which described the uncertainty derived from the adopted information of the river system and the randomicity from the occurrence of nonpoint source pollution, could provide different WEC combined with reliabilities for different hydrological seasons. As a case study, the total nitrogen (TN) WEC in the Changle River located in southeast China was calculated using the method. Results indicated that the TN WEC with 90% of reliability were 487.9, 949.8 and 1 392.8 kg·d$^{-1}$ in dry season, average season and flood season, respectively, and the dilution effect of river water flow accounted for the main content of WEC. In order to satisfy water quality target of the river, about 1 258.3-3 591.2 kg·d$^{-1}$ of current TN quantity that entered into the river should be reduced in watershed, and the largest reducing quantity of TN was occurred during flood season. The uncertainty method, which reflected hydrology and water quality variations in the nonpoint source polluted river, provided a more reliable and efficient method for the WEC calculation.

**Key words**: water environmental capacity; nonpoint source pollution; uncertainty; Monte Carlo simulation; river; total nitrogen

水环境容量计算是水污染总量控制的基础[1]. 在水环境容量计算中, 通常首先设定目标水质和一定保证率下的最枯月流量, 再用一维或二维的水环境容量模型进行以年为单位的计算[2~4]. 显然, 一般情况下, 河流实际的水环境容量均大于这一设计条件下的计算值, 这无疑增加了控污减排的压力. 同时, 河流流量、流速、污染物浓度和综合降解系数等信息都存在着一定的不确定性. 这些信息的不确定性一方面是由于自然因素的随机变化引起的, 如暴雨事件等; 另一方面是人为因素的影响引起的, 如水文水质参数测定误差等. 因此, 由这些信息计算得到的水环境容量也具有不确定性. 为此, 许多学者应用未确知数学理论或盲数理论[5~7]、概率稀释模型[8]、

收稿日期: 2009-07-20; 修订日期: 2009-09-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA10Z218); 国家自然科学基金项目(40871104)

作者简介: 陈丁江(1979 ~ ), 男, 讲师, 主要研究方向为流域水资源与水质, E-mail: chendj@zju.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: jlu@zju.edu.cn

Monte Carlo 模拟[9]等方法进行了针对点源污染河流的水环境容量不确定性计算和分析. 美国的每日最大负荷量(TMDL)计划中也考虑了污染物排放量、河流流量等的时间变化,并且包含了安全临界值以体现 TMDL 计算过程中的不确定性[10].

随着非点源污染问题越来越突出,将总量控制体系纳入到非点源污染的防治中具有重要意义[11]. 非点源污染的发生是一个受气候、土壤、生物和人类活动综合影响的随机过程,其时空分布和排放量都很难进行准确的定量[1],使得非点源污染为主河流的水质变异及其模型模拟结果的不确定性更为显著[12],这进一步增加了其水环境容量的时间变异性及其计算的不确定性. 因此,从分期尺度上开展非点源污染河流水环境容量的不确定性分析研究具有现实必要性. 然而,目前尚鲜见关于非点源污染河流水环境容量的不确定性分析的研究报道.

本研究针对非点源污染河流系统的不确定性问题,从分期的尺度提出了基于 Monte Carlo 的非点源污染河流水环境容量的不确定分析方法,以期为实现非点源污染的总量控制提供依据.

## 1 非点源污染河流的水环境容量的不确定性分析方法

对于非点源污染为主的河流而言,可以认为污染物沿河段按均匀形式进入河流,则一定设计条件下河流水环境容量计算模型可以表示为[13]:

$$w = \frac{k\frac{x}{u}\left[c_s q_d - c_0 q_0 \exp\left(-k\frac{x}{86\,400u}\right)\right]}{1-\exp\left(-k\frac{x}{86\,400u}\right)} \times 10^{-3} \tag{1}$$

式中,$w$ 为计算河段的水环境容量($kg \cdot d^{-1}$),$c_s$ 为控制目标条件下段末的污染物浓度($mg \cdot L^{-1}$),$c_0$ 为设计条件下段首污染物浓度($mg \cdot L^{-1}$),$q_d$ 为段末设计流量($m^3 \cdot s^{-1}$),$q_0$ 为段首设计流量($m^3 \cdot s^{-1}$),$u$ 为设计条件下河段平均流速($m \cdot s^{-1}$),$k$ 为设计条件下河流中污染物综合降解系数($d^{-1}$),$x$ 为河段长度(m).

按照式(1)计算得到的河流水环境容量是与一定设计条件相对应的一个确定数值,而不是河流实际的水环境容量. 在实际的河流水环境系统中,由于自然条件和人为因素的影响,河段段首和段末流量、污染物浓度、综合降解系数、流速等参数信息都具有显著的时间变异性和不确定性,因此,河流水环境容量本身就难以准确地用一个确定数值来表示. 同时,非点源污染发生的随机性和动态性进一步增加了非点源污染河流的水环境容量计算的不确定性. 根据《全国地表水环境容量核定和总量分配工作方案》,要求选择 90% 保证率或者近 10 年最枯月平均流量为设计流量. 显然,这样的设计条件适用于点源污染为主的河流,而很难适用于非点源污染为主的河流. 这是由于非点源污染的发生往往取决于流域的水文运动过程,降雨径流和排水是非点源污染产生的原动力和载体[14,15],使得丰水期非点源污染河流水体中污染物浓度或通量往往高于枯水期的[16]. 如果按式(1)和以上的设计条件计算得到的水环境容量进行总量控制,忽视了水环境容量和非点源污染本身具有的时间变异性,将大大增加丰水期非点源污染物排放量的削减压力,不利于总量控制方案的实施. 因而,非点源污染河流的水环境容量计算又必须建立在分期的尺度上. 综上所述,非点源污染河流的水环境容量应在分期的尺度上进行不确定性分析.

根据式(1),可以得到非点源污染河流的实时水环境容量计算模型:

$$w_r = \frac{k_r\frac{x}{u_r}\left[c_s q_{d,r} - c_{0,r} q_{0,r} \exp\left(-k_r\frac{x}{86\,400u_r}\right)\right]}{1-\exp\left(-k_r\frac{x}{86\,400u_r}\right)} \times 10^{-3} \tag{2}$$

式中,$w_r$ 为计算河段的实时水环境容量($kg \cdot d^{-1}$),$c_{0,r}$ 为段首污染物实时浓度($mg \cdot L^{-1}$),$q_{d,r}$ 为段末实时流量($m^3 \cdot s^{-1}$),$q_{0,r}$ 为段首实时流量($m^3 \cdot s^{-1}$),$u_r$ 为河段实时平均流速($m \cdot s^{-1}$),$k_r$ 为河流中污染物实时综合降解系数($d^{-1}$);其它符号同式(1).

根据式(2),可以采用盲数理论[5]、蒙特卡罗方法[9]、贝叶斯法[17]等对非点源污染河流的水环境容量进行不确定性求解. 蒙特卡罗方法(Monte Carlo Method)已经广泛应用于水环境模拟模型的不确定性分析、参数估算等研究中[12,18,19]. 针对本研究问题,可以通过以下步骤应用 Monte Carlo 方法进行不确定性求解:由于非点源污染的发生具有显著的时间变异性,且主要取决于流域的水文运动过程,首先,根据研究河流的水文气象资料进行水文期划分,然后在分期的尺度上分析式(2)中的段首和段末流量、段首污染物浓度、综合降解系数等输入参数实测值的概率分布,根据统计检验结果(即 $p$ 值大小)选择各参数最适宜的概率分布形式;其次,利用随机参数发生器方法,产生具有与这些参数相同概率分布

的数值,并赋值给各个参数,按各参数的概率分布随机抽样,输入到式(2)中,计算出水环境容量. 每一次计算就对应于实际上可能发生的一个情况. 如此反复进行 $n$ 次,就可以模拟得到实际中可能发生的 $n$ 种情况;最后,根据 $n$ 次计算结果,经统计分析后,得出不同水文期中河流水环境容量的概率分布,从而实现对水环境容量的不确定性分析.

## 2　实例研究

以长乐江为研究对象,其流域内的主要土地利用方式为农地(水田、旱地、茶园、苗圃、林地、竹园)和农村人居地,工业排污企业相对较少,农业非点源是河流中污染物的主要来源. 2004 年长乐江流域 TN 的入河量为1 266.4 $t \cdot a^{-1}$,其中化肥施用是河流 TN 的主要来源(70.5%)[1].

### 2.1　数据来源和分析

2004-01 ~ 2007-12 对长乐江上的 3 个监测点进行了以月为单位的采样和分析. 水样中总氮(TN)含量采用碱性过硫酸钾氧化、紫外分光光度法测定(GB 11893-89). 不同月份中河流 TN 的综合降解系数($K$)采用室内模拟测定和野外条件校正相结合的方法进行率定[20]. 每月的河流水文和气象资料分别由浙江省水文局和当地气象站提供. 研究河段水质控制目标根据《浙江省水功能区、水环境功能区划分方案》(2005)确定,即 TN≤2.0 $mg \cdot L^{-1}$.

水环境容量计算模型输入参数的概率分布检验采用 SPSS12.0 软件. 采用@ Risk 软件中的 Monte Carlo 方法进行水环境容量的不确定性分析和水环境容量模型输入参数的灵敏度分析.

### 2.2　TN 水环境容量模型输入参数的概率分布

长乐江每月的段末流量($y$)与降雨量($x$)呈显著的线性正相关($y = 0.1207x + 1.2309$, $r^2 = 0.7535^{**}$, $n = 48$),这表明长乐江属于雨水补给型河流. 同时,由于降雨径流是非点源污染发生的重要载体[14,15],因此,根据多年月平均降雨量的年内分布情况,将全年分为 3 个水文期:枯水期(主要出现在 10、11 和 12 月)、平水期(主要出现在 1、2、3、4、7、8 月)、丰水期(主要出现在 5、6、9 月). 采用 SPSS16.0 软件中的单样本 K-S 法对式(2)中不同水文期的各输入参数实测值进行概率分布的统计分析(表 1). 从表 1 中可以看出,不同水文期中河段平均流速、段首输入浓度和流量、段末流量以及综合降解系数均符合正态分布($p > 0.05$). 不同水文期中长乐江上游输入的 TN 浓度($c_{0,r}$)平均值($\mu$)均超过了 2.0 $mg \cdot L^{-1}$,这进一步增加了长乐江流域控制 TN 污染的压力;且丰水期 > 平水期 > 枯水期,这体现了非点源污染的作用[16],表明从分期尺度进行水环境容量计算的必要性[1].

**表 1　长乐江 TN 水环境容量模型输入参数概率分布检验结果**

Table 1　Probability distributions for the input variables of TN water environmental capacities model in Changle River

| 水文期 | 参数 | 概率分布类型 | $p$ 值 | $\mu$ | $\sigma^2$ | 变异范围 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 枯水期 | $u_r$/m · $s^{-1}$ | 正态 | 0.934 | 0.125 | 0.035 | [0.056, 0.195] |
| | $c_{0,r}$/m · $L^{-1}$ | 正态 | 0.995 | 2.614 | 1.053 | [0.654, 4.680] |
| | $k_r$/$d^{-1}$ | 正态 | 0.582 | 0.260 | 0.131 | [0.042, 0.518] |
| | $q_{0,r}$/$m^3$ · $s^{-1}$ | 正态 | 0.060 | 0.676 | 0.859 | [0.056, 2.448] |
| | $q_{d,r}$/$m^3$ · $s^{-1}$ | 正态 | 0.309 | 7.915 | 7.035 | [0.680, 22.120] |
| 平水期 | $u_r$/m · $s^{-1}$ | 正态 | 0.766 | 0.174 | 0.038 | [0.099, 0.250] |
| | $c_{0,r}$/m · $L^{-1}$ | 正态 | 0.717 | 3.045 | 1.554 | [0.480, 6.106] |
| | $k_r$/$d^{-1}$ | 正态 | 0.606 | 0.278 | 0.161 | [0.035, 0.597] |
| | $q_{0,r}$/$m^3$ · $s^{-1}$ | 正态 | 0.688 | 1.024 | 0.555 | [2.145, 2.120] |
| | $q_{d,r}$/$m^3$ · $s^{-1}$ | 正态 | 0.933 | 12.080 | 5.544 | [2.330, 22.980] |
| 丰水期 | $u_r$/m · $s^{-1}$ | 正态 | 0.638 | 0.207 | 0.046 | [0.117, 0.296] |
| | $c_{0,r}$/m · $L^{-1}$ | 正态 | 0.855 | 4.363 | 1.810 | [1.030, 7.920] |
| | $k_r$/$d^{-1}$ | 正态 | 0.803 | 0.304 | 0.218 | [0.030, 0.739] |
| | $q_{0,r}$/$m^3$ · $s^{-1}$ | 正态 | 0.914 | 1.501 | 0.837 | [0.204, 3.154] |
| | $q_{d,r}$/$m^3$ · $s^{-1}$ | 正态 | 0.847 | 17.493 | 6.952 | [4.500, 31.140] |

### 2.3　TN 水环境容量模型输入参数的灵敏度

根据以上分析得到的各概率分布函数,采用拉丁超立方法取样[21],分别赋值于段首和段末流量、段首浓度、综合降解系数、河段平均流速等参数,输入到式(2)进行计算,应用 Monte Carlo 方法模拟进行10 000次,以确保获得收敛的结果. 采用@ Risk 软件包计算了斯皮尔曼等级相关系数(spearman rank correlation coefficient, SRCC),以确定式(2)的各输

入参数对水环境容量计算值的灵敏度. SRCC 值越大,表明该参数对水环境容量计算值影响越大. 从图 1 中可以看出,段末流量 $q_{d,r}$ 是对水环境容量最灵敏的输入参数,SRCC 值为 0.895 ~ 0.934;其次为综合降解系数 $k_r$,其 SRCC 值为 0.217 ~ 0.325. 这表明稀释容量是长乐江 TN 水环境容量的主要组成部分,其次为自净容量. 在实际中,应重点提高段末流量的监测精度,以减小水环境容量计算中的不确定性;而增加河流流量能显著提高水环境容量,每增加 1.0 $m^3 \cdot s^{-1}$ 的段末流量能平均增加 222 $kg \cdot d^{-1}$ 的 TN 水环境容量.

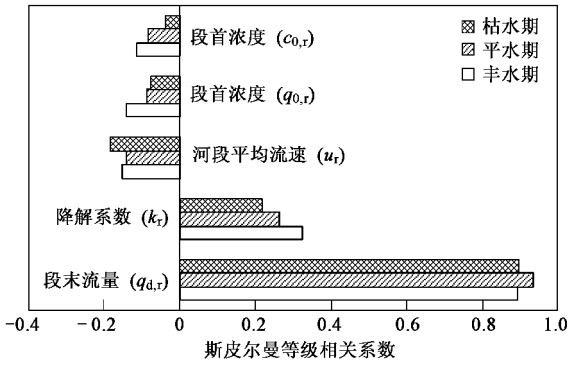


**图 1 长乐江 TN 水环境容量计算模型输入参数灵敏度分析**

Fig. 1 Sensitivity analysis for the input variables of the TN water environmental capacity model in Changle River

## 2.4 TN 水环境容量的不确定性分析

根据 Monte Carlo 方法模拟的10 000次结果,可以进一步确定长乐江各水文期 TN 水环境容量的概率分布,从而获得不同可信度下的水环境容量(图 2). 一般地,在同一可信度下丰水期 TN 水环境容量值最大,这体现了不同水文期河流流量的稀释作用大小. 由图 2 中水环境容量值的累积频率大小排序结果,可以求得任意可信度水平下的 TN 水环境容量,为水环境管理提供了更为丰富的决策信息. 美国环保总署建议水质超标出现的时间频率不超过 10%,即水质达标的可信度应达到 90%[22]. 从表 2 可以看出,90% 可信度下长乐江枯水期、平水期、丰水期的 TN 水环境容量分别为 487.9、949.8、1 392.8 $kg \cdot d^{-1}$. 按 90% 保证率最枯月流量计算得到的 TN 水环境容量为 824.6 $kg \cdot d^{-1}$,显然,这低估了丰水期和平水期的实际水环境容量,将增加 TN 入河量的削减压力;但大大高估了枯水期的实际水环境容量,其可信度为 81.8%,将增加河流 TN 超标的风险. 为了使水质达标的可信度达到 90%,流域各水文期需削减 TN 现状入河量1 258.3 ~ 3 591.2 $kg \cdot d^{-1}$,其中丰水期是削减量最大的时期. 采用不确定性分析方法得到的水环境容量值是基于河流水文水质状态的实际变化,并在考虑了其取值的可信度基础上进行的,显然,这相对于按某一设计流量来确定水环境容量的常规处理方法更为科学、合理.

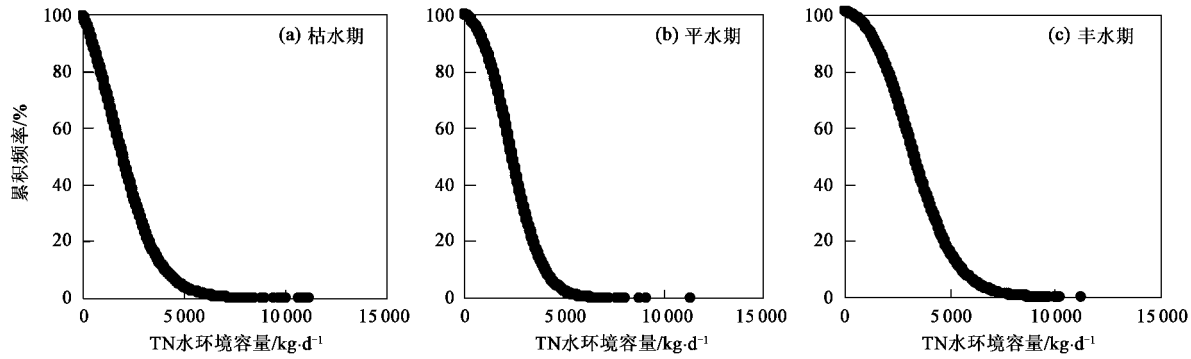


**图 2 长乐江不同水文期 TN 水环境容量的概率分布**

Fig. 2 Probability distributions of the TN water environmental capacity for different hydrological season in Changle River

**表 2 长乐江 TN 水环境容量和 TN 入河削减量/$kg \cdot d^{-1}$**

Table 2 TN water environmental capacities and TN reducing quantity in Changle River/$kg \cdot d^{-1}$

| 方法 | 水文期 | 水环境容量 | 入河削减量 |
|---|---|---|---|
| 不确定性分析方法(取 90% 可信度) | 枯水期 | 487.9 | 1 258.3 |
| | 平水期 | 949.8 | 2 710.5 |
| | 丰水期 | 1 392.8 | 3 591.2 |
| 90% 保证率最枯月流量计算方法 | 枯水期 | 824.6 | 921.6 |
| | 平水期 | 824.6 | 2 835.7 |
| | 丰水期 | 824.6 | 4 159.4 |

## 3 结论

(1) 基于 Monte Carlo 的非点源污染河流水环境容量的不确定性分析方法,表达了由获取的河流系统信息不确定性和流域非点源污染发生的随机性引起的水环境容量计算结果不确定性,给出了不同水文期在不同可信度下的河流水环境容量,计算结果更为科学、合理.

(2) 通过水环境容量计算模型输入参数的灵敏度分析,不仅可以确定对水环境容量计算结果最为敏感的输入参数,而且能区分河流的稀释作用和自净能力对水环境容量的作用大小,为减小水环境容量计算的不确定性和实际的水环境管理提供了决策依据.

(3) 按照水环境功能区划的水质要求,长乐江枯水期、平水期、丰水期 90% 可信度下的 TN 水环境容量分别为 487.9、949.8、1 392.8 $kg \cdot d^{-1}$;据此,不同水文期流域的 TN 现状入河量需削减1 258.3 ~ 3 591.2 $kg \cdot d^{-1}$,丰水期是削减量最大的时期.

**参考文献:**


[1] 陈丁江,吕军,金树权,等. 非点源污染河流的水环境容量估算和分配[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1416-1424.

[2] 龚若愚,周源岗. 柳江柳州段水环境容量研究[J]. 水资源保护, 2001, **1**: 31-32.

[3] 胡国华,赵沛伦,王任翔. 黄河孟津-花园口河段水环境容量研究[J]. 水资源保护, 2002, **1**: 26-28.

[4] 李永军,陈余道,孙涛. 地理信息模型方法初探河流环境容量——以漓江桂林市区段为例[J]. 水科学进展, 2005, **16**(2): 280-283.

[5] 李如忠,汪家权,王超,等. 不确定性信息下的河流纳污能力计算初探[J]. 水科学进展, 2003, **14**(4): 459-463.

[6] 王忠燕,孙世群,王辉. 基于盲数理论的南肥河水环境容量核算研究[J]. 环境科学与管理, 2008, **31**(1): 33-37.

[7] 闫欣荣,史忠科. 盲信息下渭河水环境容量及消减量研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2007, **39**(5): 684-689.

[8] 王有乐,周智芳,王立京,等. 黄河兰州段水环境风险容量研究[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(6):72-73.

[9] 曹芦林. $BOD_5$ 容量计算的不确定性分析[J]. 上海环境科学, 1991, **10**(10): 15-19.

[10] US EPA. Protocol for developing nutrient TMDLs [R]. Washington D C:Office of Water, EPA 841-B-99-007, 1999.

[11] 王少平,俞立中,许世远,等. 基于 GIS 的苏州河非点源污染的总量控制[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(6): 520-524.

[12] 张巍,郑一,王学军. 水环境非点源污染的不确定性及分析方法[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1290-1296.

[13] 陈丁江,吕军,沈晔娜,等. 饮用水水源保护区河流水环境容量计算模型[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2437-2440.

[14] Oenema O, Roest C W J. Nitrogen and phosphorus losses from agriculture into surface waters, the effects of policies and measures in the Netherlands [J]. Water Sci Technol, 1998, **37**(3): 19-30.

[15] Grizzetti B, Bouraoui F, De Marsily G, *et al*. A statistical method for source apportionment of riverine nitrogen loads [J]. J Hydrol, 2005, **304**: 302-315.

[16] Chen D J, Lu J, Yuan S F, *et al*. Spatial and temporal variations of water quality in Cao-E River of eastern China [J]. J Environ Sci, 2006, **18**(4): 680-688.

[17] Liu Y, Yang P J, Hu C, *et al*. Water quality modeling for load reduction under uncertainty: A Bayesian approach [J]. Water Res, 2008, **42**(13): 3305-3314.

[18] Steven C C M. Engineering water quality models and TMDLs [J]. J Water Resour Plann Manag, 2003, **129**(4): 247-256.

[19] 严齐斌. 河流水质参数估计的蒙特卡罗方法[J]. 水利水电技术, 2006, **37**(10):14-16.

[20] 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. 169-171.

[21] 周渊. 关于蒙特卡罗模拟抽样方法的研究[J]. 强度与环境, 1997, **3**:14-18.

[22] US EPA. Guidelines for Preparation of the Comprehensive State Water Quality Assessments [R]. Washington D C: Office of Water, EPA 841-B-97-002A, 1997.