

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.03.005

基于逆建模技术的淮河干流长台关—息县段入河污染负荷评估

周金金,阮晓红

(南京大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210093)

摘要 :以淮河上游长台关—息县段为研究对象,以 2008 年为算例,根据研究区域汇流特征,建立分布式源模型,基于贝叶斯统计方法进行逆建模,利用断面水质序列实测资料,测算区域入河污染负荷及主要水质因子降解系数。结果表明,淮河上游长台关—息县段 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 入河污染负荷总量分别为 1.7 万 t/a、8.9 万 t/a,受主要入流面源污染负荷季节性影响, $\text{NH}_3\text{-N}$ 入河污染负荷为 657.55 ~ 2 014.99 t/月,COD 入河污染负荷为 3 897.73 ~ 13 311.83 t/月,研究区域水体环境 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 降解系数分别为 0.356/d、0.202/d, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 负荷模拟值和实测值的相关系数分别为 0.943、0.979。

关键词 :分布式源模型;逆建模技术;面源污染负荷;淮河干流

中图分类号:X32 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2012)03-0028-04

Estimation of pollution load in Changtaiguan-to-Xixian section of main stream of Huaihe River based on inverse modeling technology

ZHOU Jin-jin, RUAN Xiao-hong

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract : A distributed source model was established according to the confluence characteristics of the Changtaiguan-to-Xixian section upstream of the Huaihe River, through a case study from 2008. The inverse modeling was conducted based on the Bayesian statistical method. The measured data of the water quality at the studied section were used to calculate the pollution load flowing into the river and the degradation coefficients of the main water quality factors. The results show that the total pollution loads of $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD in the study area were 17 000 t per year and 89 000 t per year, respectively. Affected by seasonal non-point source pollution loads, the pollution loads of $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD were 657.55 t to 2 014.99 t per month and 3 897.73 t to 13 311.83 t per month, respectively. The degradation coefficients of $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD were 0.356 per day and 0.202 per day, respectively. The correlation coefficients between simulated and measured values of $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD were 0.943 and 0.979, respectively.

Key words : distributed source model; inverse modeling technology; non-point source pollution load; main stream of Huaihe River

由于非点源污染发生的时空不确定性,流域面源污染负荷定量化评价一直是研究的热点问题。随着最大日负荷(TMDL)控制在流域水环境管理中的推广应用,便捷和较为准确地估算环境水体入流面源污染负荷越显重要。自 20 世纪 90 年代起,非点源污染负荷评价模型由简单的输出系数模型、线性回归模型发展到复杂的机理模型^[1]。其中,基于水

量、水质监测数据建立的经验统计方法,其结果的精确度及合理性有待提高,而基于流域综合模拟的非点源负荷估算模型,如 SWAT、AGNPS、HSPF、CREAMS 等复杂机理模型,因对基础数据的大量需求及现有观测站点设置的局限性而难以广泛应用^[2]。近年来,随着水量、水质自动监测技术的快速发展和应用,将逆建模技术与贝叶斯统计方法相结

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07210-010)

作者简介:周金金(1987—),女,硕士研究生,研究方向为水资源环境及保护。E-mail:jjzhou1987@126.com

通讯作者:阮晓红,教授。E-mail:Ruanxh@nju.edu.cn

合 进行非点源污染负荷的估计得到了一定的应用^[4-7]。与传统的统计模型比较,该方法可以进一步研究模型及参数的不确定性对计算结果的影响,以获取更好的模拟精度。

淮河流域是我国重要的农业基地,占流域面积 56.93%的河南及安徽两省是我国重要的粮食增长核心区,大量农药、化肥的施用将导致非点源污染在水污染负荷中的比重不断提高,正确评估面源入河污染负荷及其特征是淮河流域水污染控制的关键问题。笔者选择淮河上游长台关-息县段为研究区,将逆建模技术与贝叶斯统计方法相结合,进行淮河流域上游面源入河污染负荷评估,进一步验证逆建模技术在面源评估中的有效性和科学意义。

1 研究区及污染负荷评价模型建立

1.1 研究区

选择淮河上游长台关-息县段为建模区间,区间河长 135.2 km,分布位置见图 1。淮河干流水体主要超标因子为 NH₃-N、COD。

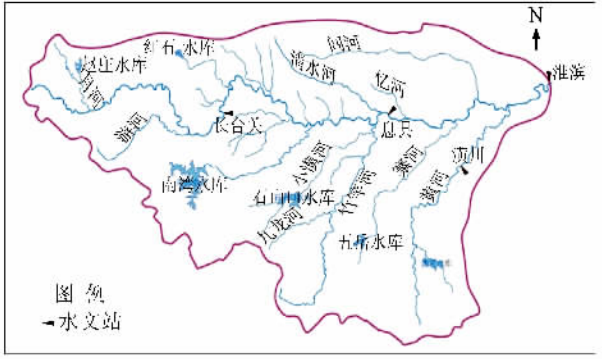


图 1 研究区域分布示意图

1.2 入河污染负荷评价模型构建

1.2.1 分布式源模型和逆建模

根据研究区域水系分布及其汇流特征,假设污染源沿河流纵向均匀入流,建立分布式源模型(DSM)进行淮河干流长台关-息县段的水质模拟。

在河流中横向、纵向充分混合,达到稳定状态时的污染物浓度可表达为:

$$Q \frac{d\rho}{dx} = -kA\rho + AL \tag{1}$$

式中: Q 为河段流量, m^3/s ; ρ 为质量浓度, mg/L ; x 为距离, m ; k 为水质降解系数, d^{-1} ; L 为分布源负荷, $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; A 为断面面积, m^2 。

河流区段分割的概念模型见图 2^[4]。

在任意 x 处的质量浓度可表达为:

$$\rho = f(k, x, Q, A, \rho_{i-1}, L) \tag{2}$$

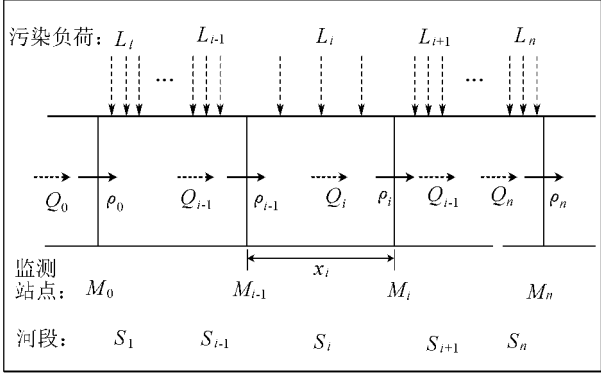
对于一个河段,出流断面的质量浓度可表达为:

$$\begin{aligned} \rho_i &= f(k, x_i, Q_i, A_i, \rho_{i-1}, L_i) = \\ &\rho_{i-1} e^{- (kA_i/Q_i)x_i} + \frac{L_i}{k} [1 - e^{- (kA_i/Q_i)x_i}] \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)可以视为一个从 L_i 到 ρ_i 的正演模型,其反演模型为:

$$k, L_i = f^{-1}(x_i, Q_i, A_i, \rho_{i-1}, \rho_i) \tag{4}$$

因此,污染负荷和降解系数的求解可以通过逆建模转换为反问题,利用贝叶斯统计方法,来寻找一系列满足一个目标函数的 k 和 L 值。



Q_i 为第 i 河段流量; L_i 为第 i 河段分布源负荷; ρ_{i-1} 、 ρ_i 为第 i 河段入流及出口断面污染物质量浓度; S_i 为第 i 河段的编号; x_i 为第 i 河段的长度; $i = 1, 2, \dots, n$, 其中 n 为划分的河段数。

图 2 多河段概念图

1.2.2 贝叶斯参数估计

上述逆建模型(4)的求解使用贝叶斯统计方法,贝叶斯理论基本表达式为

$$\begin{aligned} p(\theta|y) &= \frac{p(\theta)p(y|\theta)}{p(y)} = \\ &\frac{p(\theta)p(y|\theta)}{\int p(\theta)p(y|\theta)d\theta} \propto p(\theta)p(y|\theta) \end{aligned} \tag{5}$$

式中: θ 是需要估计的参数值,为逆建模型(4)的降解系数 k 和单位体积污染负荷 L , $\theta = \{k_{\text{NH}_3\text{-N}}, k_{\text{COD}}, L_1, L_2, \dots, L_n\}$; $p(\theta|y)$ 是 θ 的后验分布,代表在观测数据 y 下参数 θ 的概率值,具体指降解系数 k 、单位体积负荷 L 在观测质量浓度 ρ_i 和 ρ_{i-1} 下的概率值; $p(\theta)$ 是 θ 的先验分布, $p(y|\theta)$ 是似然函数,是观测浓度关于参数降解系数、单位体积负荷的条件分布。

基于 MCMC 抽样方法进行的贝叶斯统计主要包括以下 3 步:①确定似然函数;②确定待估参数的先验分布;③对后验概率分布进行 MCMC 抽样。

假定污染物质量浓度的实测值和模拟值误差服从标准正态分布,则具有误差项的模拟值可表达为:

$$\begin{aligned} \rho_i^* &= \rho_i + \epsilon(0, \sigma^2) = \rho_{i-1} e^{- (kA_i/Q_i)x} + \\ &\frac{L_i}{k_i} [1 - e^{- (kA_i/Q_i)x}] + \epsilon(0, \sigma^2) \end{aligned} \tag{6}$$

式中: ρ_i^* 为污染物质量浓度的观测值, ρ_i 为污染物

质量浓度的模拟值; ϵ 为服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 的误差项, 其似然函数表达式为,

$$\prod_{i=1}^{n_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{\left(\rho_i^* - \rho_{i-1} e^{-\left(k A_i / Q_i \right) x} - \frac{L_i}{k_i} \left(1 - e^{-\left(k A_i / Q_i \right) x} \right) \right)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (7)$$

式中: $n_1 = 23$, 为息县出口断面浓度观测次数。

对 MCMC 的实施, 笔者基于软件包 WinBUGS 进行 Gibbs 抽样计算^[8-9]。

根据文献[4-7], 设定求解参数的先验分布为: $\sigma^2 \sim U(10^{-3}, 10^{-3})$, $L \sim U(0, L_m)$, $k \sim U(0, k_m)$, 其中参数 L_m 、 k_m 基于文献[3-7]及以往计算经验设定, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 的单位负荷取值上限分别为 $2.0 \text{ g}(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、 $10 \text{ g}(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 降解系数取值上限分别为 $0.7/\text{d}$ 、 $0.3/\text{d}$ 。

1.2.3 数据来源

模型计算数据来自淮河流域水资源保护局的常规观测资料, 收集了研究区域息县水文站、长台关水文站 2008 年水文、水质例行同步监测数据。其中, 水文指标包括水位、流量, 水质指标包括 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD。

2 结果与讨论

在模型运行中, 先进行 5 000 次 Gibbs 预迭代, 以确保参数的收敛性。然后丢弃(burn-in)最初的预迭代, 再进行 10 000 次 Gibbs 迭代。迭代从第 5 001 次开始至 15 000 的 WinBUGS 运行结果见图 3。由图可知, 出口断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 模拟值与实测值相关系

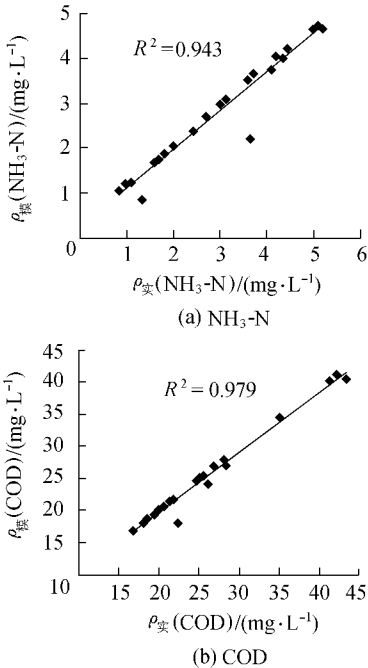


图3 淮干息县断面 2008 年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 模拟值与实测值散点图

数分别达到 0.943、0.979, 最大相对误差分别为 36.7%、19.3%, 表明模型达到收敛, 计算结果可靠、准确性高。

计算结果表明:

a. $k_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 均值为 $0.356/\text{d}$, 95% 置信区间为 $(0.274, 0.436)/\text{d}$, k_{COD} 均值为 $0.202/\text{d}$, 95% 的置信区间为 $(0.153, 0.250)/\text{d}$, 降解系数的核密度估计见图 4。

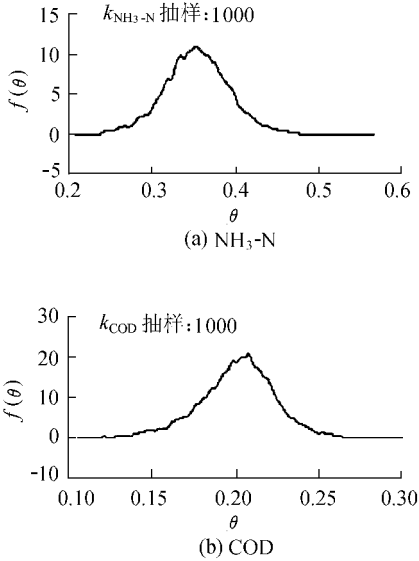


图4 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 降解系数核密度估计

b. 研究区长台关-息县段单位体积污染负荷均值、中间值及 95% 置信区间如图 5 所示。2008 年淮河上游长台关-息县段 $\text{NH}_3\text{-N}$ 单位体积入河污染负荷均值为 $0.46 \sim 1.71 \text{ g}(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, COD 单位体积入河

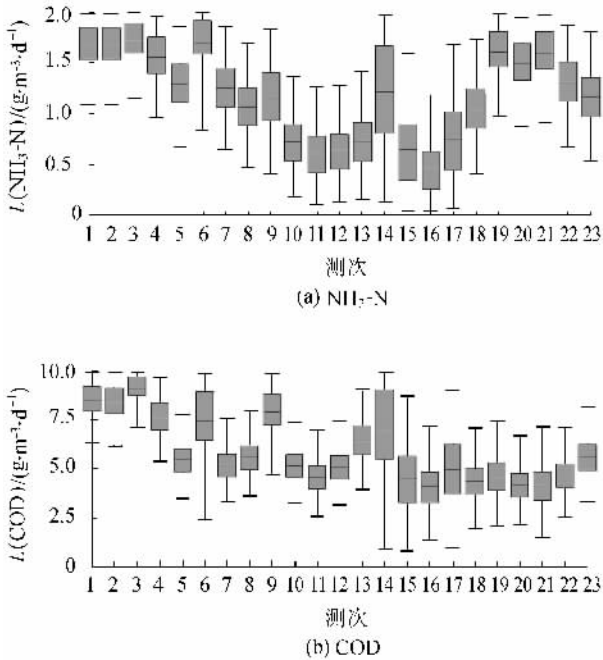


图5 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 单位体积污染负荷箱线图

污染负荷均值为 4.07 ~ 9.1 g/(m³·d)

c. 2008 年息县断面水质及其入流流量与入流污染负荷对照见图 6。由图 6 可知 ,COD 的月入河污染负荷为 3 897.73 ~ 13 311.83 t ,均值为 7424.29 t ,标准差为 2 439.09 t ;NH₃-N 的月入河负荷为 657.55 ~ 1 777.49 t ,均值为 1 421.25 t 、标准差为 354.75 t ,研究区段枯水季断面水质浓度均高于丰水季 ,根据研究区域地表水与地下水水位差所显示的补给关系、河道上下游氮的浓度变化及其区段污染源的分布特征 ,表明研究区段在枯水期地表水接受地下水的持续氮源补给。

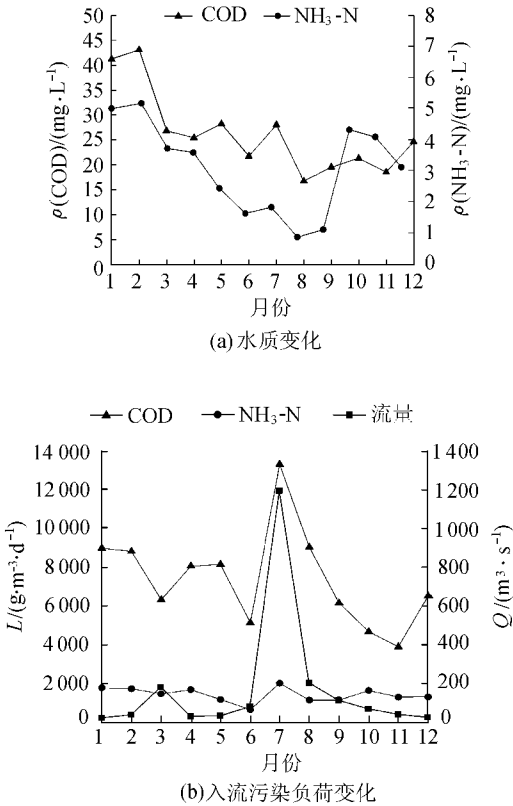


图 6 2008 年息县水文站断面水质及其月均入流流量与月入流污染负荷对照

d. 根据水体功能要求 ,可进行单位体积水体最大日负荷计算 ,计算公式如下 :

$$L_{m,i} = \frac{k[\rho_{g,i} - \rho_{g,i-1}e^{-\frac{kA_i}{Q_i}x}]}{1 - e^{-\frac{kA_i}{Q_i}x}} \quad (8)$$

式中 : $\rho_{g,i}$ 和 $\rho_{g,i-1}$ 分别为研究区及其上游水域功能标准限值 ,根据淮干上游长台关-息县段水功能目标 ,本文上游 $\rho_{g,i}$ 取 II 类水标准限值 , $\rho_{g,i-1}$ 取 III 类水标准限值。

计算结果见图 7。由图 7 可知 ,NH₃-N、COD 现状月污染负荷都不同程度的超过河流最大月负荷 ,其中 NH₃-N 削减率为 33.55% ~ 78.46% ,COD 削减率为 5.12% ~ 51.27%。

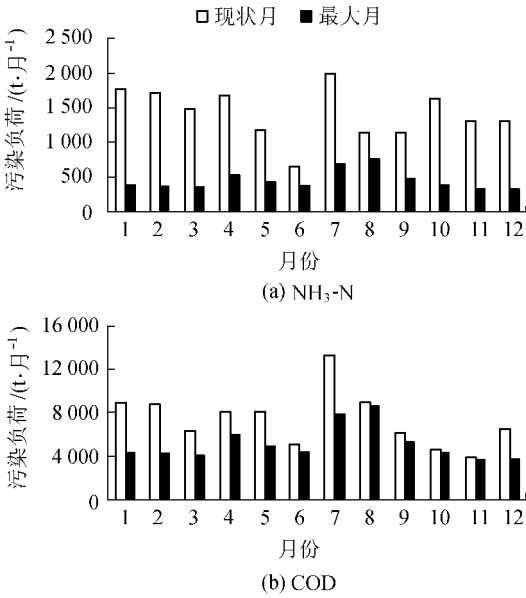


图 7 2008 年淮干长台关-息县段 NH₃-N、COD 的现状月负荷及最大月负荷

3 结 论

对于较为均匀的入流河流 ,充分利用历史水质监测断面资料 ,建立分布源模型 ,利用逆建模技术和贝叶斯统计方法进行环境水体污染物降解系数和污染负荷的估计 ,操作方便简单 ,结果准确可靠。

利用淮河干流上游息县断面 2008 年的水文水质资料 ,对长台关-息县段进行了入流污染物 NH₃-N、COD 的单位体积日入河量、月入河量和年入河量估算 ,结合研究区段点源入河负荷观测资料 ,可以进行面源入河污染负荷估算 ,根据息县断面 III 类水的功能需求 ,NH₃-N、COD 月入河污染负荷均不同程度地超过最大月负荷。

根据息县断面 COD 和 NH₃-N 浓度、月均流量及月污染负荷变化的对照分析可知 ,淮干长台关-息县段枯水期存在地下水的氮源补给。

进一步的研究可以结合点源分布位置 ,修正分布源模型 ,以便更为精确地评估面源入河污染负荷。

参考文献 :

[1] 李恒鹏 ,杨桂山 ,黄文钰 ,等 .太湖上游地区面源污染氮素入湖量模拟研究[J].土壤学报 ,2007 ,44(6):1063-1069.
[2] 杨淑静 ,张爱平 ,杨世琦 .农业非点源污染现状分析及国内外研究进展[J].中国农业气象 ,2009 ,30(S1):82-85.
[3] 盈尚轩 .淮凤台县至淮南段水污染控制研究[D].合肥 :合肥工业大学 ,2009.

(下转第 37 页)

争营养、光照等,对自身生长繁殖越有利,从而达到改善水质的目的。当水体中 N 的质量浓度变动在 5.00 mg/L 时,菹草生长速度最快;当 N 的质量浓度上升到 10.00 mg/L 时,菹草植株会发生腐烂。

c. 营养盐丰富有助于缓解浮游植物与菹草之间的竞争,促进两者的生长繁殖。但有机质和营养盐质量分数过量则不利于菹草的生长,浮游藻类在该种水体中占据优势。装有苏州重污染河道未疏浚河段底泥的试验桶内浮游植物优势门为绿藻门。疏浚后浮游藻类数量和生物量均减少。

d. 底栖附泥藻类的数量及生物量受底泥含水率和有机质质量浓度的影响,有机质质量比为 27.00 g/kg、含水率为 50% 左右时,底栖附泥藻类多样性较好。底泥有机质质量比达到 256.40 g/kg 时底栖附泥藻类在底泥表层仍能正常生长和繁殖。说明底栖附泥藻类中发现的颗粒直链藻、小环藻、冠盘藻、菱形藻和绿球藻是耐污能力较强的种类。疏浚后的河道底泥含水率较低,但经过一段时期的泥-水界面反应,其底泥含水率得以提高,底栖附泥藻类数量及生物量将会增加,将有利于底栖附泥藻类的种群多样性。

参考文献：

[1] 刘建康.高级水生生物学[M].北京:科学出版社,1999:233-237.

[2] KUMAR P ,GUPTA R K. Growth characteristics of Potamogeton crispus and Elodea Canadensis in polluted water[J]. Pollution Research 2002 21(3) 305-307.

[3] 高华梅,谷孝鸿,曾庆飞,等.不同基质下菹草的生长及其对水体营养盐的吸收[J].湖泊科学 2010 22(5) 655-659.

[4] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等.沉水植物重建对富营养化氮磷营养水体的影响[J].应用生态学报 2003 14(8) :1351-1353.

[5] 米玮洁.不同湖泊沉积物营养特征与沉水植物菹草生长的应答关系研究[D].武汉:华中农业大学,2008:133-135.

[6] 倪乐意.富营养水体中肥沃底质对沉水植物生长的胁迫[J].水生生物学报 2001 25(4) 399-405.

[7] 段昌群.环境生态学[M].北京:科学出版社,2004:315-321.

[8] 包先明,陈开宁,范成新,等.种植沉水植物和疏浚底泥对氮磷营养水平的影响[J].土壤通报 2006 37(5) 932-935.

[9] 濮培民,王国祥,胡春华,等.底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗?[J].湖泊科学 2000 12(3) 269-279.

[10] AE N ,ARIHARA J ,OKADA K ,et al. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian

subcontinent[J]. Science ,1990 248 :477-480.

[11] CARR G M. Macrophyte growth and sediment phosphorus and nitrogen in a Canadian prairie river[J]. Freshwater Biology , 1998 39 :525-536.

[12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社 2002 224-622.

[13] 张兰芳,朱伟,操家顺,等.污染水体中悬浮物对菹草(*Potamogeton crispus*)生长的影响[J].湖泊科学 2006 18(1) :73-78.

[14] 秦伯强,高光,胡维平,等.浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考[J].湖泊科学 2005 17(1) 9-16.

[15] 朱敏,王国祥,王建,等.南京玄武湖清淤前后底泥主要污染指标的变化[J].南京师范大学学报:工程技术版,2004 4(2) 66-69.

[16] 张兰芳.水质条件对沉水植物(伊乐藻、菹草)生长的影响[D].南京:河海大学 2006 23-32.

[17] 赵振华,阮晓红,邢雅固,等.城市重污染河道水质及底栖附泥藻类生态特征[J].环境科学 2009 30(12) 3579-3584.

[18] 丁国际,赵洪涛,邹联沛,等.曝气、氮和磷对滇池底泥中菹草生长的影响[J].湖南科技大学学报:自然科学版 2008 23(2) :120-124.

[19] 尹大强,覃秋荣,阎航.环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J].湖泊科学 1994 2(3) 240-244.

[20] 金相灿.湖泊富营养化控制和管理技术[M].北京:化学工业出版社 2001 52-57.

(收稿日期 2011-09-05 编辑 徐 娟)

(上接第 31 页)

[4] LIU Yong ,YANG Ping-jian ,HU Cheng ,et al. Water quality modeling for load reduction under uncertainty :a Bayesian approach[J]. Water Research 2008 42 :3305-3314.

[5] SHEN Jian ,ZHAO Yuan. Combined Bayesian statistics and load duration curve method for bacteria nonpoint source loading estimation[J]. Water Research 2010 44 :77-84.

[6] LI Zhan-ling ,XU Zong-xue ,SHAO Quan-xi ,et al. Parameter estimation and uncertainty analysis of SWAT model in upper reaches of the Heihe river basin[J]. Hydrological Processes , 2009 23 :2744-2753.

[7] GABRIELE F ,GIORGIO M. Bayesian approach for uncertainty quantification in water quality modelling :the influence of prior distribution[J]. Journal of Hydrology 2010 392 :31-39.

[8] LUNN D J ,THOMAS A ,BEST N ,et al. WinBUGS-a Bayesian modelling framework :concepts ,structure ,and extensibility[J]. Statistics & Computing 2000 10 :325-337.

[9] MALVE O ,QIAN S S. Estimating nutrients and chlorophyll a relationships in Finnish lakes[J]. Environmental Science & Technology 2006 40(24) :7848-7853.

(收稿日期 2011-12-26 编辑 徐 娟)