

水环境非点源污染的不确定性分析方法

张巍¹, 郑一², 王学军¹

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要:本文回顾了水环境非点源污染研究,特别是模型模拟工作的发展状况。对水环境非点源污染中不确定性的来源和分析方法进行了介绍。针对非点源污染模型模拟中的不确定性问题,总结了 Morris 敏感性筛选法、蒙特卡罗模拟、拉丁超立方抽样法、响应曲面法等定量数学方法,并分析其应用范围和优缺点。阐述了不确定性分析在非点源污染管理中的应用,以及目前的难点和进一步的研究方向。

关键词:非点源;水环境污染;不确定性;模型

中图分类号:X522 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1290-07

Review on Uncertainty Analysis Methods for Non-point Sources Pollution

ZHANG Wei¹, ZHENG Yi², WANG Xue-jun¹

Abstract:Based on a review of the non-point sources pollution study and modeling simulation, this paper provides an introduction of the causes and analysis methods for uncertainty in non-point sources pollution. The mathematical methods(including the Morris Morris Qualitative Screening Technique, Monte Carlo Simulation, Latin Hypercube Sampling, and Response Surface Method), that applied to uncertainty analysis of non-point sources pollution simulation models were summarized, and their application limits were discussed. Finally the application of uncertainty analysis in non-point sources pollution management was illustrated, and the existing problem and development trend were presented.

Keywords:non-point sources pollution; aquatic environment pollution; uncertainty; modeling

水体污染就其来源的空间分布形式可以分为两类:点源(Point Sources)与非点源(Nonpoint Sources)。点源污染是指通过沟渠管道集中的污染排放,如工业废水和生活污水的排放,有固定的排放点,排放量和浓度随生产、生活活动有规律性的周期变化。非点源污染是指溶解的或固体污染物(城市垃圾、农药、化肥及其他有毒物质)从非特定的地点,在降水和径流冲刷下进入受纳水体造成的污染^[1]。非点源污染又可分为农业非点源和城市非点源。农业非点源污染是指人们在从事农业耕作活动时,由于使用化肥、农药以及农田水土流失而引起的受纳水体(如河流、湖泊、水

库、海湾等)的污染。城市地表径流是指降雨淋洗与冲刷城市大气和地表各种污染物,排入地表水体而引起的污染。与点源相比,非点源污染具有来源的复杂性(包括:农业、林业、运输、大气沉降、城区、建筑工地、采矿、底泥等)、发生时间的随机性(降水随机性引起)、发生地点的空间差异性(不同地点污染贡献差异大)、以及监测、控制与处理的困难和复杂性等特点,难以有效地监测和控制。在非点源污染研究中引入不确定性分析,能够给出非点源污染的风险水平并提供更好的决策支持。特别是在对非点源污染的模型模拟工作中,模型结果受随机因素影响具有很大的不确定性,如何认识非点源污染模型结果的不确定性并进行定量评价已经成为非点源污染模型研究的前沿课题。本文围绕水环境非点源污染的不确定性问题,阐述不确定性的来源和表示方法,着重介绍非点源污染模型不确定性的数学分析方法。

收稿日期:2008-05-30

基金项目:国家自然科学基金(No. 40525003, No. 40371105)

作者简介:张巍(1977—),男,博士研究生,主要研究方向为区域环境科学。E-mail:wzhang@pku.edu.cn

通讯作者:王学军 E-mail:xjwang@urban.pku.edu.cn

1 非点源污染研究与模型模拟

发达国家在 20 世纪 60 年代开始关注非点源污染,70 年代起进行系统研究并付诸管理实践。我国在 20 世纪 80 年代以来才逐渐认识到非点源污染问题的重要性,我国真正意义上的非点源污染研究始于北京城市径流污染的研究及 20 世纪 80 年代初的全国湖泊、水库富营养化调查和河流水质规划研究^[2]。非点源污染的核心研究内容包括:污染的驱动力与机制、非点源污染状况、模型模拟与预测、非点源污染的水环境效应、污染控制措施等 5 个方面,对于这些方面的研究进展已经有很多综述^[1-10]。研究者普遍认识到,由于非点源污染具有空间差异大、分布范围广、影响因子复杂等特点,难以有效地监测。非点源污染物的产生、迁移、负荷受随机因素的显著影响,相应的模型模拟也有很大的不确定性。如何充分考虑非点源的不确定性,是非点源污染研究的一个重要课题。

在非点源污染研究中,模型模拟是一个重要部分,也是非点源污染不确定性分析的主要环节。非点源污染物质的输移涉及多个过程,其中降雨径流过程,土壤侵蚀与流失过程,以及污染物在水体中的迁移、转化、沉积过程是决定非点源污染运移特征的主要过程^[11]。国外已经开发了许多流域非点源污染模型并且将其应用到流域污染负荷模拟及管理措施的制定和评价中。我国由于基础资料缺乏等原因,流域非点源污染模型开发较少,而是较多将国外成熟的流域非点源污染模型引入我国流域非点源污染模拟及流域管理中^[12]。国外非点源模型的研究发展可以分为三个阶段^[4]:第一阶段主要出现在 20 世纪 70 年代初期以前,作为非点源污染研究基础的水文与土壤侵蚀模型研究取得一定的进展,1940 年 Zing^[13]提出第一个土壤侵蚀模型,在此基础上 1965 年 Wischmeier 等^[14]提出了著名的通用土壤流失方程 (USLE),为非点源污染定量计算奠定了基础。该阶段的特点是基础研究与基于统计方法建模,不能给出污染物迁移转化机理上的解释。第二阶段主要出现在 20 世纪 70 年代中期至 80 年代,非点源污染的机理模型成为研究热点,如 STORM、ANSWERS、HSPF 等模型。该阶段模型的特点是:大都以水文过程数学模型为基础,能描述污染物迁移转化的物理、化学与生物过程,可以进行连续时间的污染负荷模拟。20 世纪 90 年代至今是第三阶段,模型的集成化程度得到进一步增强,功

能更加完善,可进行大流域的连续模拟。分布式水文模型的发展突破计算机计算能力限制的瓶颈,非线性、尺度、惟一性、等效性与不确定性 5 大问题成为其发展面临的难点^[15,16]。20 世纪 90 年代后期以来,模型发展的突出特点是集流域分析、评价、总量控制、污染治理与费用效益分析等于一体,代表性模型如 BASINS、WARMF 等。

我国对非点源污染模型的探索始于 20 世纪 80 年代。分为自主研发和修改应用国外模型两类。20 世纪 80 年代,基于接纳水体水质分析,计算汇水区农业非点源污染输出量的经验统计模型发展较快并广泛应用,例如,朱萱等^[17]研究了区域径流污染负荷模型。20 世纪 90 年代,黑箱经验统计模式常见于农业非点源污染研究中,李怀恩等^[12]开发的机理型流域暴雨径流响应模型是这一时期的重要研究成果,它要求参数少,应用范围广,比较适合我国目前资料短缺的非点源污染现状研究。2000 年洪小康等^[18]提出了有限资料条件下估算降雨径流污染年负荷量的水质水量相关法,并在汉江、黑龙江某些流域进行了成功应用。在借用国外模型进行非点源污染研究方面具有代表意义的是:刘枫等^[19]在于桥水库流域非点源污染研究中,首次将通用土壤流失方程在我国用于非点源污染的危险区域识别研究。张雪松等^[20]将 SWAT 模型应用于黄河下游卢氏流域产沙模拟。杜鹏飞等^[21]将 AGNPS 与 GIS 结合,为北京官厅水库流域非点源污染控制规划与管理决策提供支持,对非点源污染控制措施组合进行了筛选。邢可霞等^[22]在滇池流域使用 HSPF 模型进行水文水质的模拟,识别了滇池流域非点源污染的负荷量及其空间分布。

2 不确定性的概念与研究方法

2.1 不确定性的概念和分类

不确定性与确定性是相互联系的。确定性是指客观事物联系和发展的过程中有规律的、必然的、清晰的、精确的属性;不确定性是指客观事物联系和发展的过程中无序的、或然的、模糊的、近似的属性。确定与不确定现象分别揭示和反映事物变化发展过程中的必然与偶然、清晰与模糊、精确与近似之间的关系。目前人们认识到的不确定性主要有 4 种^[23]:

(1)随机性:由于条件提供的不充分和偶然因素的干扰,使现象或结果的出现呈现偶然性。例如径流量的大小会随着降雨而变化,从而表现为随机性;

(2)模糊性:复杂事物的界线不分明,对其概念不

能给出确定的描述和确切的评定标准。例如目前对非点源还缺乏明确的定义,是否将城市降雨径流定义为城市非点源,是否将没有下水道系统的小城镇和村庄的污水排放定义为点源,还有很多争议;

(3)灰色性:由于事物的复杂性、外在干扰和认知能力的限制,人们只了解系统的部分信息或信息量所呈现的大致范围。例如应用“径流效应”估算非点源污染负荷时,由于各种闸控和水库的影响而无法明确区分基流(点源)组分和径流(非点源)组分^[28];

(4)未确知性:是纯主观认识上的不确定性。与灰色性相比,它具有较多的信息量,不但知道信息量的取值范围,还知道所求量在该区间的分布状态。

2.2 不确定性的研究方法

针对各种不确定性已有相应的数学方法,研究随机性的方法是概率论和数理统计,研究模糊性的方法是模糊系统理论和模糊数学,研究灰色性的方法是灰色系统理论和灰色数学,研究未确知性的方法是未确知数学^[24]。随机方法中应用最广的是蒙特卡罗(Monte Carlo)方法,该方法以概率统计理论为基础,是成熟且有效的处理非线性问题的统计方法之一,适用范围很广。传统的蒙特卡罗随机模拟运算量巨大,一些减少模拟次数的改进技术比如重要抽样法、拉丁超立方抽样法、以及条件期望法等被用来减少传统随机方法的模拟抽样次数。

模糊理论和灰色系统理论一般只考虑输入与输出而很少研究模型参数的物理实质,因此它们都属于“黑箱”模型。由于水环境非点源污染系统复杂多变,目前许多生物、化学过程的反应机理还不十分清楚,一些参数难于准确测量,水环境的这种模糊性本质为模糊数学的应用提供了用武之地,尤其适用于水质综合评价,例如王玲杰等^[25]对模糊数学、灰色系统理论、物元可拓理论数学分析方法在河流水质评价中的适用条件和置信度进行了对比。

灰色系统理论具备利用“少数据”建模以寻求现实规律的良好特性,在水质模拟预测领域通常有两种应用方式:将确定性模型中的全部或部分变量处理为灰色变量获得灰色解,或在实测时序数据基础上,根据灰色系统建模原理,建立水质的灰色模拟模型来进行水质预测。如果采用优化技术,还可依据实测数据对水质模型中的参数进行灰色识别。例如王红莉等^[25]采用统计回归、灰色预测等方法建立海岸带污染负荷预测模型,解决了由于数据缺乏或相互关系不明确而带来的环境系统的不确定性问题。

3 非点源污染研究中的不确定性及其分析方法

3.1 非点源污染研究中不确定性的来源

非点源污染研究中的不确定性主要来源于 3 个方面:1)非点源污染本身所固有的不确定性:对污染物迁移输送过程中的物理、化学和生物过程认知不足;2)数据不确定性:非点源污染相关的实测数据的准确度不高,如气象条件、土地利用、化肥施用等;3)各种数学模型本身的结构、参数以及求解过程的不确定性因素。

从非点源污染的产生和输送过程来看,驱动因素的随机变化会使非点源污染具有随机性。比如,流域径流量的大小随着降雨的随机变化而变化,从而使污染物的冲刷表现为随机性。同时由于径流输送过程的复杂性,人们对径流产流、汇流规律的认识和数据的获得常常带有随机性。非点源污染的产流和汇流深受气候、气象、地形、地貌、植被等条件的影响。在目前的客观条件下,人们既不能很准确地取得水文资料,也不可能获得流域内水循环诸要素(降水、蒸发、截留、下渗、土壤水、地表及地下径流等)可靠的时空变化值。在非点源模型结构方面,由于对非点源污染迁移转化过程认识不够全面而造成模型结构或方程存在一定的误差,从而带来模拟结果的不确定性,即使大的物理模型也不能准确地描述发生自然条件下的各种水文和化学过程^[27]。模型参数的拟和和校正过程中,根据经验估计或者观测值优化得到的参数并不能保证模型应用的精度和预测结果的可靠性。在追求更加高效和稳定优化算法的同时,所得到优化参数的后验分布具有本质上的不确定性。对于复杂模型来说,甚至无法判断优化结果是否达到了全局最优,也无法预测“最优”参数对于模型预测的影响。

目前非点源模型模拟过程中,特别是在引入国外模型时,由于缺乏不同条件下的野外实测工作,模型参数校验的精度不够,应用结果有很大不确定性。例如应用 SWAT 模型时,其查询表(look-up table)中不同参数类型会给结果带来很大差异,即使参数类型一样,在不同地区这些参数对当地气候、土壤等条件的敏感性不尽相同,这也可能对模拟结果带来较大影响^[28]。在水文过程模拟中,由于我国监测网络尚不完善,模型的校验通常只在有数据的水文站进行,即通过流域下游某水文站的监测数据和模拟结果的对比不断调整有关参数,最后使模型得以率定。而事实上,流域内不同水文响应单元产流条件不相同,产流结果也会不

同,各子流域间可能产生更大的差异^[28]。因此,不确定性是非点源模型模拟,特别是负荷估算过程中需要考虑的重要问题。

3.2 非点源污染不确定性分析的数学方法

非点源不确定性的定量分析主要集中在非点源污染的模型模拟方面,概率随机理论是常用的数学方法。近年来,基于水文模型参数及水文预报的不确定性问题在国际上得到了广泛和深入的研究,并取得了很大的成果,如 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) 方法^[29], BaRE (Bayesian Recursive Estimation) 方法^[30], 响应面法等^[31,32]。总体而言,对非点源模型的不确定性分析可分为两类:参数敏感性分析和概率分析。

3.2.1 敏感性分析

模型参数的敏感性分析包括局部敏感性分析和全局敏感性分析。局部敏感性分析检验单个参数的变化对模型结果的影响程度;全局敏感性分析则检验多个参数的变化对模型运行结果总的影响,并分析每一个参数及其参数之间相互作用对模型结果的影响。局部敏感性分析方法简单、计算量较小、应用较广,最常用的是 Morris 筛选法。全局敏感性分析考虑了多参数间的综合作用,有利于得到整个参数集的最优解,但是其计算量巨大,很难适用于参数较多的复杂模型,常用的是多元回归法。

Morris 筛选法及其修正方法是传统的参数敏感性分析方法,目前应用较广。该方法选取模型中某一参数,其余参数值固定不变,在参数最佳估计值附近进行“微扰动”,计算这一波动所导致模型输出的变化率,来判断参数变化对输出值的影响程度。修正的 Morris 筛选法采用自变量以固定步长变化,灵敏度判别因子取 Morris 多个平均值。Francos 等人^[33]的研究表明,当自变量在阈值范围内按某一固定步长变化的时候, Morris 筛选法计算的精确度相对较高。郝芳华等^[34]以黄河流域下游的洛河流域为研究区,采用 Morris 筛选法,分析了代表降雨量及其时空分布、土地利用类型、土壤类型、农业管理措施等不确定性影响因素对径流量、泥沙负荷、吸附态氮和溶解态氮模拟计算的敏感性。黄金良等^[35]运用修正 Morris 筛选法对 SWMM 模型的水文水力模块的相关参数进行了局部灵敏度分析。

基于“最佳”估计参数值的敏感性分析不能完整地描述模型参数的空间分布形态。同时,复杂的模型结构导致参数之间具有相关性,这就要求在敏感性分

析过程中必须考虑参数之间的相互影响,而不是仅靠变动某一个参数得到模型响应。由此发展了全局敏感性分析方法,线性回归系数法是一种常用的全局敏感性分析方法。该方法通过随机采样产生参数样本序列,计算每个样本对应的模型响应,然后进行线性回归。建立线性模型^[36]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \xi$$

其中 k 是输入变量数, ξ 是误差项, b_i 为对应于参数 x_i 的线性回归模型系数,表征了参数 x_i 对模型响应 y 的贡献率,即为基于线性回归方法得到的参数 x_i 的绝对灵敏度,由于模型参数量纲不同,通常计算参数相对灵敏度 SRC:

$$SRC(x_i) = b_i \frac{S_{x_i}}{S_y}$$

其中 S_y 和 S_{x_i} 分别代表模型输出 y 和参数样本 x_i 的标准差,每个参数的敏感性可以通过 SRC 的绝对值来评价。刘毅等^[37]以一个经典的水文箱式模型为实例,采用传统灵敏度分析、线性回归等方法对复杂模型的参数特性进行了识别与比较研究。

3.2.2 概率分析

概率分析是描述系统不确定性的最常用方法,特别是当不确定参数的概率分布函数已知时。在这种方法中,一般是根据模型输入的概率分布来确定模型输出的概率分布,最终用概率分布的形式来表达不确定性。常用的概率分析法包括蒙特卡罗方法、拉丁超立方抽样法、响应曲面法等。

蒙特卡罗法是进行模型不确定性分析最常用的方法。其主要原理是从输入参数的概率密度函数中随机取样,多次运行模型得到模型输出的概率统计分布。蒙特卡罗法的主要缺点在于它需要大量的取样并进行多次模型运行,对于计算量较大的模型,这种方法需要大量的时间和资源。此外蒙特卡罗法不能完全阐释各参数不确定性之间相互作用的复杂性和影响。基于蒙特卡罗法有多种改进的方法,在环境模型中得到广泛的应用。Nandakumar 等^[38]用蒙特卡罗法研究了降雨、潜在蒸发和模型参数对径流量的影响。Dilks 等^[39]利用 Bayesian 蒙特卡罗法来量化由参数不确定性引起的水质模型的误差。Mailhot 等^[40]采用改进的 Metropolis 蒙特卡罗法对城市暴雨水质管理模型参数的不确定性进行了研究。

拉丁超立方抽样法是一种多维分层抽样方法,也是改进蒙特卡罗方法中最常用的一种抽样方法。设

N 为要实现的样本数目, n 为随机变量数目, 拉丁超立方抽样将第 j 个随机变量 X_j 的定义域等概率地划分为 N 个区间, 在每个区间中随机的抽取一个点, 再从每个变量的空间里随机抽出上一步中选取的点, 将它们组成向量。Aalderink 等^[36]利用拉丁超立方抽样研究了参数、边界条件、点源和非点源负荷以及初始条件对 Vecht 河流铜浓度及负荷的影响。

响应曲面法是假设随机输入变量对于结构响应变量的影响可以用数学函数来表达, 采用一个二次多项式来逼近这个函数, 一旦确定了这个近似函数, 就可以用它来代替有限元模型, 然后再使用常规的概率分析方法对这个拟合模型进行不确定性分析。当结构响应与随机输入变量之间没有大的突变时, 其拟合精度较高, 计算量小。Cryer 等应用响应面法对农田杀虫剂淋失模拟的不确定性进行了分析^[32]。

4 不确定性分析在非点源污染管理中的应用

由于非点源污染发生机制所固有的不确定性, 以及分析手段、方法及工具的影响, 非点源的管理控制措施可能带来的效果也具有不确定性, 这种不确定性即构成了流域非点源污染控制方案的风险, 因此在非点源污染管理方案的评价中进行不确定分析尤为必要^[42]。目前关于非点源污染管理的不确定性研究不多, 蒋颖等^[43]以巢湖杭埠-丰乐河及其流域为研究区域, 应用 WARMF 模型, 通过局部灵敏度分析和摩尔斯敏感判别因子筛选风险因子, 将不确定性带来的不可控风险的分析与非点源污染控制功能区划相结合, 对流域总量控制下的非点源污染控制方案进行了风险分析。张巍等^[44]用概率约束规划的方法对非点源排污交易中的不确定性问题进行了研究, 建立了不确定条件下流域点源-非点源排污交易模型, 通过管理者对流域总量目标实现的接受概率而将不确定性纳入到模型之中。Bystrom 等^[45]研究了在不确定条件下, 湿地对农业非点源氮污染处理的成本效率问题。

5 结论

随着对点源治理的深入, 点源污染在包括我国在内的许多国家已经得到了较好的控制, 而非点源污染由于涉及范围广、控制难度大, 目前已成为影响水环境质量的重要污染源。水环境非点源污染是一个充满不确定性因素的复杂系统, 非点源污染的不确定性主要来源于 3 个方面: (1) 非点源污染的产生和传输本身的复杂性; (2) 人们对污染物迁移输送过程中的物

理、化学和生物过程缺乏足够认知, 实测数据的量和准确度不高; (3) 各种数学模型本身的结构、参数以及求解过程的不确定性因素。概率随机理论、模糊数学和灰色系统理论是研究水环境非点源污染不确定性的三类常用方法。定量分析非点源污染的不确定性, 特别是在模型模拟和负荷估算中, 量度模拟结果的不确定性, 对于提高非点源污染研究水平, 制定有效的非点源污染防治措施, 具有重要的意义。就非点源污染不确定性分析技术本身而言, 目前的难点主要是对一些复杂非点源污染模型的不确定性分析, 如何对模型结构误差问题进行量化。今后这方面研究的重点将是进一步改进模型、优化数据采集方案、改进不确定性分析技术, 以尽量减少模型预测的不确定性。同时如何将不确定性分析结果运用于非点源污染管理也需要进一步的探讨。

参考文献:

- [1] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 87-91.
HE Chan-sheng, FU Bo-jie, CHEN Li-ding. Non-point Source Pollution Control and Management[J]. *Environmental Science*, 1998, 19(5): 87-91.
- [2] 郑 一, 王学军. 非点源污染研究的进展与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 105-110.
ZHENG Yi, WANG Xue-jun. Advances and Prospects for Nonpoint Source Pollution Studies[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(1): 105-110.
- [3] 王少丽, 王兴奎, 许 迪. 农业非点源污染预测模型研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 265-271.
WANG Shao-li, WANG Xing-kui, XU Di. Advances in the Prediction Models of Agricultural Non-point Source Pollution [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(5): 265-271.
- [4] 徐力刚, 张 奇. 流域非点源污染物转移模型研究现状及展望[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 316-322.
XU Li-gang, ZHANG Qi. Status and Prospects of Models for Non-Point Source Pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(S1): 316-322.
- [5] 李贵宝, 尹澄清, 单宝庆. 非点源污染控制与管理研究的概况与展望[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3): 190-191.
LI Gui-bao, YIN Cheng-qing, SHAN Bao-qing. Current Situation and Prospect of Control and Management on Non-Point Source Pollution[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(3): 190-191.
- [6] 朱铁群. 我国水环境农业非点源污染防治研究简述[J]. 农村生态环境, 2000, 16(3): 55-57.
ZHU Tie-qun. Prevention and control of water pollution caused by agricultural non-point sources in China [J]. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(3): 55-57.
- [7] 何 萍, 王家骥. 非点源(NPS)污染控制与管理研究的现状、困境与挑战[J]. 农业环境保护, 1999, 18(5): 234-237.

- HE Ping, WANG Jia-ji. Present Situation, Difficulties and Challenge in the Research on Regulation of Nonpoint source Pollution[J]. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(5): 234-237.
- [8] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 1996, 16(1): 66-71.
- BAO Quan-sheng, WANG Hua-dong. The research and prospect on non-point source pollution of water environment in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(1): 66-71.
- [9] 杨爱玲, 朱颜明. 地表水环境非点源污染研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 1999, 7(5): 60-67.
- YANG Ai-ling, ZHU Yan-ming. The study of nonpoint source pollution of surface water environment[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 1999, 7(5): 60-67.
- [10] 徐 谦. 我国化肥和农药非点源污染状况综述[J]. 农村生态环境, 1996, 12(2): 39-43.
- XU Qian. A Review on the status of non-point source pollution of chemical fertilizers and pesticides in China[J]. *Rural Eco-Environment*, 1996, 12(2): 39-43.
- [11] Mander U, Forsberg C. Nonpoint pollution in agricultural watersheds of endangered coastal seas[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14: 314-324.
- [12] 李怀恩. 流域非点源污染模型研究进展与发展趋势[J]. 水资源保护, 1996(2): 14-18.
- LI Huai-en. Status and prospects of watershed non-point source pollution model[J]. *Water Resources Protection*, 1996(2): 14-18.
- [13] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- ZHAO Qi-guo. Temporal-spatial Change, Mechanism and Control of Soil Degradation in the Red Soil Area of Eastern China[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [14] Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains[M]. *USDA Agricultural Handbook*, 1965.
- [15] 李 新, 康尔泗, 王书功. 分布式水文模型的进展及展望[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 61-65.
- LI Xin, KANG Er-si, WANG Shu-gong. Progress and Perspective of Distributed Hydrological Models[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(1): 61-65.
- [16] Beven K J. How far can we go in distributed hydrological modeling[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2001, 5(1): 1-12.
- [17] 朱 萱, 鲁纪行, 边金钟, 等. 农田径流非点源污染特征及负荷量化方法探讨[J]. 环境科学, 1985, 5: 6-11.
- ZHU Xuan, LU Ji-xing, BIAN Jin-zhong, et al. Study on the feature and load estimation method for agricultural Non-point source pollution[J]. *Environmental Science*, 1985, 5: 6-11.
- [18] 洪小康, 李怀恩. 水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(4): 384-386.
- HONG Xiao-kang, LI Huai-en. Correlation method of water quality and quantity and its application to load estimation of nonpoint source pollution[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2000, 16(4): 384-386.
- [19] 刘 枫, 王华东, 刘培桐. 流域非点源污染的量化识别方法及其在
- 于桥水库流域的应用[J]. 地理学报, 1988, 43(4): 329-339.
- LIU Feng, WANG Hua-dong, LIU Pei-tong. The Quantitative identification of nonpoint source pollution and its application in the Yuqiao Reservoir Watershed[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1988, 43(4): 329-339.
- [20] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 38-42.
- ZHANG Xue-song, HAO Fang-hua, YANG Zhi-feng, et al. Runoff and sediment yield modeling in meso-scale watershed based on SWAT Model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(4): 38-42.
- [21] 杜鹏飞, 宋 科, 张大伟, 等. 流域非点源污染控制决策支持系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 10: 1343-1346.
- DU Peng-fei, SONG Ke, ZHANG Da-wei, et al. Watershed non-point source pollution control decision support system[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2003, 10: 1343-1346.
- [22] 邢可霞, 郭怀成, 孙延枫, 等. 基于 HSPF 模型的滇池流域非点源污染模拟[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 229-232.
- XING Ke-xia, GUO Huai-cheng, SUN Yan-feng, et al. Simulation of Non-point Source Pollution in Lake Dianchi basin based on HSPF Model[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(2): 229-232.
- [23] 左其亭, 吴泽宁, 赵 伟, 等. 水资源系统中的不确定性及风险分析方法[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 116-121.
- ZUO Qi-ting, WU Ze-ning, ZHAO Wei. Uncertainties in water resources system and risk analysis method[J]. *Arid Land Geography*, 2003, 26(2): 116-121.
- [24] 王清印, 倪天智, 刘开第, 等. 不确定性数学及其研究方向[A]. 灰色系统学术论文集[C]. 开封: 河南大学出版社, 1993.
- WANG Qing-yin, NI Tian-zhi, LIU Kai-di, et al. Uncertainty mathematics and its development[A]. *Proceedings of Grey System Study*[C]. Kaifeng: Henan University Press, 1993.
- [25] 王玲杰, 孙世群, 田 丰. 不确定性数学分析方法在河流水质评价中的应用[J]. 合肥工业大学学报, 2004, 27(11): 1425-1429.
- WANG Ling-jie, SUN Shi-qun, TIAN Feng. Application of uncertainty mathematic analysis methods in river water quality assessment[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2004, 27(11): 1425-1429.
- [26] 王红莉, 姜国强, 陶建华. 海岸带污染负荷预测模型及其在渤海湾的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(3): 307-312.
- WANG Hong-li, JIANG Guo-qiang, TAO Jian-hua. Pollution load forecasting model and its application in Bohai Bay [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(3): 307-312.
- [27] Haan C T, Zhang J. Impact of uncertain knowledge of model parameters on estimated runoff and phosphorus loads in the lake Okeechobee basin[J]. *Transactions of the ASAE*, 39(2): 511-516.
- [28] 于 涛, 孟 伟, Edwin Ongley, 等. 我国非点源负荷研究中的问题探讨[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 401-407.
- YU Tao, MENG Wei, Edwin Ongley, et al. Problems and recommendations for non-point source pollution identification in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 401-407.
- [29] Beven K J, Binley A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction[J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6(3): 279-298.

- [30] Thiemann M, Trosset M, Gupta H, et al. Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(10):2521–2535.
- [31] Cryer S A, Applequist G E. Direct treatment of uncertainty: I—Applications in aquatic invertebrate risk assessment and soil metabolism of chlorpyrifos[J]. *Environmental Engineering Science*, 2003a, 20:155–167.
- [32] Cryer S A, Applequist G E. Direct treatment of uncertainty: II—Applications in pesticide runoff, leaching and spray drift exposure modeling[J]. *Environmental Engineering Science*, 2003b, 20:169–181.
- [33] Francos A. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, 79(2):205–218.
- [34] 郝芳华, 任希岩, 张雪松, 等. 洛河流域非点源污染负荷不确定性的影响因素[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(3):270–274.
HAO Fang-hua, REN Xi-yan, ZHANG Xue-song, et al. Uncertain affecting factor of the non-point source pollution load[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3):270–274.
- [35] 黄金良, 杜鹏飞, 何万谦, 等. 城市降雨径流模型的参数局部灵敏度分析[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(4):549–553.
HUANG Jin-liang, DU Peng-fei, HE Man-him, et al. Local sensitivity analysis for urban rainfall runoff modelling[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(4):549–553.
- [36] Aalderink R H, Zoeteman A, Jovin R. Effect of input uncertainties upon scenario predictions for the river Vecht[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(2):107–118.
- [37] 刘 毅, 陈吉宁, 杜鹏飞. 环境模型参数识别与不确定性分析[J]. *环境科学*, 2002, 23(6):6–10.
LIU Yi, CHEN Ji-ning, DU Peng-fei. Parameters Identification and Uncertainty Analysis for Environmental Model[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(6):6–10.
- [38] Nandakumar N, Mein R G. Uncertainty in rainfall runoff model simulations and the implication for predicting the hydrologic effects of land-use change[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 192:211–232.
- [39] Dilks D W, Canale R P, Merier P G. Development of Bayesian Monte Carlo techniques for water quality model uncertainty[J]. *Ecological Modeling*, 1992, 62(1–3):149–162.
- [40] Mailhot A, Gaume E, Villeneuve J P. Uncertainty analysis of calibrated parameter values of an urban storm water quality model using Metropolis Monte Carlo algorithm[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(5):141–148.
- [41] 邢可霞, 郭怀成. 环境模型不确定性分析方法综述[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(5):112–114.
XING Ke-xia, GUO Huai-cheng. Review on uncertainty analysis methods in environment model[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(5):112–114.
- [42] Beven K J. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrologic modeling[J]. *Advances in Water Resource*, 1993, 16:41–51.
- [43] 蒋 颖, 王学军, 胡连伍, 等. 流域总量控制下的农业非点源污染控制方案及其风险分析—以杭埠—丰乐河流域为例[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3):807–812.
JIANG Ying, WANG Xue-jun, HU Lian-wu, et al. Agricultural non-point pollution control under watershed total load control and risk analysis of control scenarios—practices on watershed of Hangbu—Fengle River [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):807–812.
- [44] 张 巍, 王学军. 应用概率约束模型分析不确定条件下非点源治理的最优策略[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(4):314–317.
ZHANG Wei, WANG Xue-jun. Chance constraint model for nonpoint source pollution: optimizing control and incentive based regulation under uncertainty [J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(4):314–317.
- [45] Bystrom O, Andersson H, Gren I. Economic criteria for using wetlands as nitrogen sinks under uncertainty[J]. *Ecological Economics*, 2000, 35:35–45.