

非点源污染不确定性研究进展

余 红, 沈珍瑶

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要 :与点源污染相比,非点源污染具有随机性、间歇性、滞后性、复杂性等特点,不易控制和治理。围绕非点源污染不确定性的来源、分类和研究方法进行综述,对国内外非点源污染不确定性的研究进行概括。国外对于非点源污染不确定性问题研究较多,但是不够系统,国内则基本未见报道,非常有必要对其进行系统研究。对非点源污染不确定性研究的发展趋势进行了评述和展望。

关键词 :非点源污染;不确定性;综述

中图分类号 :X52 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2008)01-0001-05

Uncertainty of non-point source pollution

YU Hong, SHEN Zhen-yao

(Environmental School, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract :In contrast with point source pollution, non-point pollution is difficult to control and prevent because of its randomness, intermittence, hysteresis and complexity. Studies on uncertainty of non-point source pollution in China and abroad were reviewed in the aspects of sources, classifications and research methods. It is pointed out that there are lots of reports on non-point source pollution uncertainty in overseas but they are not systematic and few reports exist in China. Thus it is necessary to carry out the research on non-point source pollution uncertainty systematically. Further development of non-point pollution research was prospected.

Key words :non-point source pollution; uncertainty; review

非点源(Non-point Source, NPS)污染的严重性及防治的重要性已经为国内外所认识。国内外开展的多项研究表明,非点源已经成为水环境的重要污染源,甚至是首要污染源。许多发达国家已经证实,农业非点源污染是导致水环境恶化的主要原因之一。据报道,美国的非点源污染量占污染总量的 2/3,其中农业非点源贡献率占非点源污染量的 75% 左右^[1]。我国的多项研究也表明,非点源污染已经上升为威胁人类饮用水的主要原因,许多水域的非点源污染超过点源污染^[2]。

非点源污染有以下主要特点:发生具有随机性;污染物的来源和排放点不固定,排放具有间歇性;污染负荷的时间变化(次降雨径流过程、年内不同季节及年际间)和空间变化幅度大;监测、控制和处理困

难而复杂^[3]。简单地说,就是不确定时间、不确定途径、不确定量^[4]。因此,非点源污染的研究与控制具有较大的难度,特别是其所体现的不确定性问题是非点源污染防治的关键之一。目前国内针对此方面的研究较少,国外研究也不够系统化,深入开展此方面的研究具有重要理论与实际意义。

1 来源及分类

不确定性即确定性的反面,它可以理解为不肯定性、不确知性,客观事物的变化性和主观描述的不准确性、随机性、偶然性^[5]。不确定性是客观事物具有的一种普遍性质,更多体现了人类对于复杂环境系统认识能力的不足。由于环境系统的复杂性而人类对其认知的有限性,不确定性广泛存在于各种社

会现象、自然现象及工程实践中。

对于非点源污染来说,其不确定性可以分为面源污染物产生(包括进入水域)的不确定性和人为描述(模型)的不确定性。①从产生和形成过程看,非点源污染与区域的降水、土壤结构、农作物类型、气候、地质地貌等密切相关,这些影响因子的不确定性决定了非点源污染的产生具有较大的不确定性。②在非点源研究中,经常应用数学模型来估计流域的非点源负荷,模拟污染物在河流中的迁移转化过程。计算模拟过程中,考虑的因素过于简单,忽略了时空变异性的影响,而实际上引起非点源污染的因素是复杂多样的、不确定的,必然会引起较大的误差。

非点源污染的不确定性多为自然的不确定性,主要有两种:①受概率控制的随机现象,如降雨的发生时间、地点、量级及时间和空间分布过程等;②因为还未完全掌握其机理,而产生的对变化规律描述与分辨的不确定性。从根本上讲,非点源的不确定性,一方面可以理解为自然现象或事件本来具有的不确定性;另一方面是现在仍基本上以离散的、要素不全的和受时空尺度限制的手段所获取的资料数据来描述、模拟和研究复杂的非点源产生和迁移转化过程所引起的不确定性(或称不准确性)。

一般数学模型的不确定性可以分为4类:①环境系统的随机性和不可预见性;②数据不确定性,包括数据缺失和失真;③模型结构的不确定性;④模型参数的不确定性。

非点源污染模型的不确定性主要是模型结构和模型参数的不确定性。模型结构的不确定性即模型自身固有的不确定性,它可能产生于对实际过程的认识还不够深入;也可能由于实际过程过于复杂而在模型中采用了一些不正确的假设和简化;对物理量之间的相关关系缺乏深刻了解,采用一些简单的

关系来代替复杂的关系,还可能是模型被应用于与模型条件不完全一致的环境中。参数的不确定性主要源于自然的多变性、测量的限制、现有数据的不足,或使用了缺乏代表性、缺乏经验和历史累积的数据^[6]。

2 研究方法

由上述可知,非点源污染的不确定性主要是模型的不确定性和参数的不确定性。对于模型结构的不确定性,一般通过开发适合实际情况的模型来克服。因此非点源的不确定性研究以模型参数的不确定性研究为主,研究方法也是以参数不确定性为研究对象。通过非点源污染的不确定性研究,得出影响非点源污染的形成和负荷的重要因素,可以有针对性地进行非点源污染的预防和管理,为水污染防治提供科学的依据。

目前,处理非点源污染不确定性的定量方法较少且不够成熟。通过对相关研究方法的分析和归纳,总结出适用于非点源污染不确定性的定量分析方法(表1)。

2.1 灵敏性分析

灵敏度分析是指分析模型对不确定性参数的响应程度。传统参数灵敏度分析方法是在某个参数最佳估计值附近给定一个人工干扰,并计算参数在这一很小范围内产生波动所导致模型输出的变化率,即扰动分析方法^[8],也称为单因素灵敏度分析。计算时,只变动某个因素而令其他因素不变,观察其对模型输出结果的影响程度,从而确定其灵敏与否。然后逐一替换其他因素,计算其他各项因素的灵敏度,直到算得模型中全部因素的灵敏度为止。

然而,传统的单因素灵敏度分析不能完整描述模型参数的空间分布形态,没有考虑参数之间的相

表 1 不确定性研究方法

方法名称	特 点
灵敏性分析	简单,但灵敏度高的参数对模型输出的不确定性的影响不一定大 ^[7] ,适合初步的可信度分析和模型参数的筛选。
区域灵敏度分析方法	考虑参数之间相互关系及非线性影响 ^[8] ,但需要大量的模拟次数而导致模拟效率不高。
一阶误差分析	简单,能够计算每个随机输入参数对总的模型输出的不确定性的贡献,但求解精度不高,只能用于模型的线性阶段。
蒙特卡罗方法	概念上简单,理论上可靠且灵活,计算程序已经很成熟,应用于不确定性分析中没有较大的限制 ^[6] ,但对参数的概率分布有较强的依赖性。
Bootstrap 法	不受参数和模型假设条件的限制,从实际数据出发,不需对观察数据作任何分布假设,适用范围很大,但对原始样本有很大的依赖性。
傅立叶敏感性检验法	考虑参数的相关性,计算结果较精确。
置信区间法	从置信限与容许限的角度,借助统计分布理论,研究参数值的不确定性。
回归分析方法	有效利用现有的资料,减少由于资料不足所造成的不确定性,主要是参数回归分析。
非参数回归方法	直接从样本的实际统计特征中去研究问题,避免由于模型假设与实际情况的重大差距或在选择模型的过程中所造成的不确定性,适用面广。
模糊数学方法	用隶属函数作桥梁将不确定性在形式上转化为确定性,即将模糊性加以数量化,从而可利用传统的数学方法进行分析处理。
区间数学方法	适用于对参数的认识不太充分的情况下,分析结果是一个区间。
GLUE 方法	吸收了 RSA 方法和模糊数学方法的优点,是一种有效的全局灵敏度分析方法,并且更少受到参数相关性的影响。

互影响,并且灵敏度高但不确定性低的参数对最终结果的影响可能小于灵敏度低但不确定性高的参数^[7]。所以提出了区域灵敏度分析方法(Regional Sensitivity Analysis,简称RSA),与传统分析方法不同,该方法克服了传统上只能对单个参数进行灵敏度分析的局限性,实现了在整个非参数空间上对其灵敏度进行评价,也就是说考虑了参数之间相互关系及非线性的影响^[8]。

2.2 一阶误差分析

一阶误差分析(First-Order Error Analysis,简称FOEA),也叫平均值的一次二阶矩法(First-Order Second-Moment,简称FOSM),源自Taylor在平均值附近的一系列展开式,只取一阶微分^[9]。一阶误差分析的应用受三个因素的影响:①模型非线性的程度;②每个随机变量的误差分布;③误差的大小^[9]。

在一阶误差分析的基础上,提出了改进一次二阶矩法(Advanced First Order and Second Moment,简称AFOSM)。AFOSM法就是将功能函数在失事面上可能的失事演算点按泰勒级数展开,取其一阶展开式计算功能函数的期望值和方差。它保留了FOEA简单的特点,减少了FOEA的缺点^[10-11]。

2.3 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗(Monte Carlo,简称MC)方法,又称随机抽样技巧或统计试验方法,是一种基于“随机数”的计算方法^[12]。该方法首先为模型中的每个不确定参数假定一个概率分布,从每个概率分布中随机抽取参数值来运行模型,重复多次,得到模型输出结果的概率分布。

应用蒙特卡罗方法必须考虑两个重要因素:①每个随机输入参数概率分布的选择;②模拟的次数^[13]。

运用蒙特卡罗方法解决不确定性问题非常关键的一步是确定随机参数的概率分布。可以通过收集和评价所有关于这些参数的有效数据、事实和理论,也可以通过理论和经验来选择常用的概率分布^[14]。Hamed^[15]指出准确估计输入参数的均值和方差比得知参数实际的概率分布更重要。

达到收敛要求的模拟次数可以由Kolmogorov-Smirnov和任意统计决定,或由经验决定,通常是由所需精度和计算能力共同决定。研究发现,应用蒙特卡罗方法时,采用拉丁立方抽样(Latin Hypercube Sampling,简称LHS)方法比采用随机抽样的抽样次数减少很多,且计算效率提高10倍^[15]。所以在计算中,可以选择适当的抽样方法来减少模拟次数。

2.4 Bootstrap方法

Bootstrap方法是从原始数据中重复抽样产生统

计推论的一种分类方法。其思想是用已知的经验分布代替未知总体分布,根据原始数据进行统计推断,不需对未知总体作任何假定,通过对已有的样本采用有放回的抽样(每个样本被抽到的概率都相同)来产生伪随机数,从而对总体的特征做出推断^[16]。

Bootstrap方法从实际观察数据出发,不需对观察数据作任何分布假设,完全从样本确定任何感兴趣的区间并进行抽样,因而比传统的不确定性分析方法更为优越。但Bootstrap方法的不足之处是对原始样本有很大的依赖性,计算的准确性依赖于抽样样本对总体分布的代表性^[17-18]。

2.5 傅立叶敏感性检验法(FAST)

傅立叶敏感性分析是将与分布式模型有较强相关性的参数加以分组,以组为单位分析各参数对输出结果影响的一种较精确计算因素敏感性的方法。在筛选分类的基础上运用傅立叶敏感性检验法对相关性较好的一些参数计算敏感度指标值,分析其对输出结果的影响程度,即模型输出结果对以上参数的敏感性。

傅立叶敏感性检验法一般用于多个互相相关参数的敏感性检验,采用对大量相关性输入参数分组计算的方法,得到敏感度指标值,是一种较精确的计算敏感度与参数不确定性的方法。

3 研究进展

不确定性本身就是一种十分复杂的自然现象,因而其影响因素也十分复杂。正确区分和认识这些影响因素是研究不确定性问题的关键和基础。关于非点源污染的不确定性研究,国外的研究较多,主要是参数的不确定性和输入信息的不确定性对研究结果的影响,而国内的研究较少。

Igor等^[19]认为应该首先识别不确定性从何而来,再是查明这些不确定性的影响。Hession等^[20]认为模型研究中应该考虑与估计不确定性问题。针对实际工作中常常进行的参数灵敏度分析,Melching等^[7]认为灵敏度高但不确定性低的参数对最终结果的影响可能小于灵敏度低但不确定性高的参数,因此认为在灵敏度分析完成后,应该进一步开展不确定性研究。

Warwick等^[21]进行了城市暴雨形成径流的不确定性估计;Lei等^[22]进行了城市暴雨径流模型的参数不确定性传递的分析;Parsori^[23]对农业非点源污染模型的输入参数的不确定性进行了研究;Kao等^[24]对非点源模型中水系特性和降雨随机性引起的不确定性进行了研究分析;Yulianti等^[25]探讨了输入信息不确定性情况下的非点源水质管理;

Sohrabi 等^[26]探讨了非点源模型的不确定性及其风险评估,但实际上是利用蒙特卡罗方法进行模型参数的不确定性分析;Wu^[13]进行了非点源污染的参数不确定性和最佳管理措施的不确定性分析;Murdoch 等^[27]分析了非点源污染中磷迁移过程的参数不确定性。这些研究都主要基于非点源污染参数的不确定性和输入信息的不确定性,采取的方法主要是传统的灵敏度分析、一阶误差分析、蒙特卡罗方法和 Bootstrap 法。但尚没有对与非点源有关的不确定性问题进行系统研究报道。

我国有关非点源污染不确定性研究的工作开展较少,郝芳华等^[28]关于洛河流域非点源污染负荷不确定性影响因素的研究,实际上是参数的灵敏度分析。关于降水不均匀性对产流的影响,张士锋等^[29]及郝芳华等^[30]进行过研究。贾仰文等^[31]认为不确定性研究是今后分布式水文模型的研究方向,薛金凤等^[32]认为不确定性研究也是今后非点源污染研究的发展趋势。2004 年 12 月,中国水问题研究论坛第二届学术研讨会以“探索水问题的复杂性与不确定性”为主题,并出版了论文集^[33],但涉及相对较广的领域,同时指出“水文水资源与水环境模拟、预测和管理中的复杂性与不确定性是水问题研究中众所周知的科学难点问题”。因此,我国有关非点源污染不确定性研究刚刚起步,特别是针对我国实际,系统开展有关非点源污染不确定性研究非常必要。

4 研究展望

到目前为止,对非点源污染的不确定性研究还没有形成一个系统的体系,还存在许多需要进一步研究的问题。

a. 不确定性的研究需继续系统和深化。在不确定性的研究过程中,主要是针对不确定性分析的一个方面开展研究,并且大多集中在参数的不确定性研究上,没有综合考虑非点源模型及其他因素引起的不确定性,需要对非点源有关的不确定性问题进行系统研究。

b. 不确定性对非点源预测的影响是错综复杂的。对非点源不确定性本身的认识还不够全面和明确,没有认清不确定性各个参数之间复杂的相互关系。研究过程中,大多假定非点源污染参数是相互独立的,而没有考虑其相关性,需要对参数的相关性进行深入研究。

c. 研究适用于非点源不确定性分析的量化方法。目前,一些不确定性方法本身存在缺陷,其分析结果必然出现偏差。如一阶误差分析只能运用于线性系统中,蒙特卡罗方法必须假设参数的分布,而

Bootstrap 对原始样本有很大的依赖性,并且这些方法在分析过程中都假定参数是相互独立的。为了综合分析不确定性,提高计算、预测的可靠性,要研究适合非点源不确定性分析方法,也可以各种分析方法相互结合,多途径、多方法地综合分析,合理选用。

d. 研究减少非点源污染不确定性的途径。影响不确定性的因素主要是人类认识客观世界能力不足造成系统分析中的一些问题具有不确定性,以及人类活动、自然现象引起的不确定性等。加强对非点源污染的监测和实验研究,对不确定参数的概率分布进行分析和验证,并利用所得数据对模型进行率定和验证,不断改进模型,使模型适合模型的应用环境,减少不确定性。

参考文献:

- [1] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染管理及控制[J]. 环境科学,1998,19(5):87-91.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 任磊,黄廷林. 水环境非点源污染的模型模拟[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2002,34(1):9-13.
- [5] 万咸涛. 江河水质监测中不确定性的应用研究[J]. 江苏环境科技,1999(2):1-4.
- [6] BECK M B. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty[J]. Water Resource Research, 1987, 23(8): 1393-1442.
- [7] MELCHING C S, WILLY B. Uncertainty in coupled nonpoint source and stream water-quality models[J]. Water Resources Planning and Management, 2001, 127(6):403-412.
- [8] 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.
- [9] BOBBA A G, SINGH V P, BENGTSSON L. Application of environmental models to different hydrological systems[J]. Ecological Modeling, 2000, 125: 15-49.
- [10] ZHANG H X. The critical flow-storm approach and uncertainty analysis for the TMDL develop process[D]. Charlottesville: University of Virginia, 2001.
- [11] 徐玉英,王本德. 水库洪水预报子系统的风险分析[J]. 水文,2001,21(2):1-4.
- [12] 裴鹿成,张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [13] WU Jing. Water-quality-based BMP approach and uncertainty analysis for integrated watershed management [D]. Charlottesville: University of Virginia, 2004.
- [14] YOON C G. Uncertainty analysis in stream water quality modeling: reliability and data collection for variance reduction [D]. New Brunswick: The State University of New Jersey,

1994.

[15] HAMED M M. Impact of random variables probability distribution on public health risk assessment from contaminated soi[J]. Soil Contam , 2000 , 9 (2) : 99-117.

[16] VACHAUD G , CHEN Tao. Sensitivity of a large-scale hydrologic model to quality of input data obtained at different scales ;distributed versus stochastic non-distributed modeling [J]. Hydrology , 2002 , 264 : 101-112.

[17] 杜本峰. 基于 Bootstrap 方法的风险度量模型及其实证分析——关于机构投资者风险度量方法的探讨[J]. 统计研究 , 2004 (1) : 49-54.

[18] EFRON B , TIBSHIRANI R J. An introduction to the Bootstrap[M]. London :Chapman & Hall , 1993.

[19] IGOR G D , COLIN D B , SABINE B. Sources of uncertainty in pesticide fate modeling[J]. The Science of the Total Environment , 2003 , 317 : 53-72.

[20] HESSION W C , STORM D E , HANN C T , et al. Watershed-level uncertainties : implications for Phosphorus management and eutrophication[J]. Enviro Qual , 2000 , 29 : 172-179.

[21] WARWICK J J , WILSON J S. Estimating uncertainty of stormwater runoff computations[J]. Water Resources Planning and Management , 1990 , 116 (2) : 187-204.

[22] LEI Jian-hua , SCHILLING W. Parameter uncertainty propagation analysis for urban rainfall modeling[J]. Water Science & Technology , 1994 , 29 (1-2) : 145-154.

[23] PARSON S C. The impact of input parameter uncertainty on decision making with the agricultural nonpoint source pollution model [D]. University Park : The Pennsylvania State University , 1995.

[24] KAO Jehng-jung , HONG Hong-Jyh. NPS model parameter uncertainty analysis for an off-stream reservoir[J]. Water Resource Bulletin , 1996 , 32 (5) : 1067-1079.

[25] YULIANTI J S , LENCE B J , JOHNSON G V , et al. Non-point source water quality management under input information uncertainty[J]. Environmental Management , 1999 , 55 : 199-217.

[26] SOHRABI T M , SHIRMOHAMMADI A , MONTAS H. Uncertainty in nonpoint source pollution models and associated risk[J]. Environmental Forensics , 2002 , 3 : 179-189.

[27] MURDOCH E G , WHELAN M J , GRIEVE I C. Incorporating uncertainty into predictions of diffuse-source phosphorus transfers(using readily available data [J]. Water Science and Technology , 2005 , 51 (3-4) : 339-346.

[28] 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.

[29] 张士锋 , 贾绍凤. 降水不均匀性对黄河天然径流量的影响[J]. 地理科学进展 , 2001 , 20 (4) : 355-363.

[30] 郝芳华 , 陈利群 , 刘昌明 , 等. 降雨的空间不均匀性对模拟产流量和产沙量不确定的影响[J]. 地理科学进展 , 2003 , 22 (5) : 446-452.

[31] 贾仰文 , 王浩 , 倪广恒 , 等. 分布式流域水文模型原理与实践 [M]. 北京 : 中国水利水电出版社 , 2005.

[32] 薛金凤 , 夏军 , 马彦涛. 非点源污染预测模型研究进展 [J]. 水科学进展 , 2002 , 13 (5) : 649-656.

[33] 夏军. 水问题的复杂性与不确定性研究与进展 [M]. 北京 : 中国水利水电出版社 , 2004.

(收稿日期 2006-10-13 编辑 :傅伟群)

· 简讯 ·

河海大学获准创办英文期刊

Water Science and Engineering

国家新闻出版总署日前正式批复 , 同意河海大学创办英文期刊 *Water Science and Engineering*(WSE , 水科学与水工程)。该刊为季刊 , 面向国内外公开发行 , 国内统一连续出版物号为 :CN32-1785/TV。

Water Science and Engineering 的办刊宗旨是 : 以党和国家的方针政策为指导 , 弘扬科学精神 , 探索水科学规律 , 创新水工程技术 ; 反映水科学研究领域的最新成果 , 交流水工程建设的新技术和新经验 , 注重人与自然的和谐共处 , 促进水资源的可持续利用 , 发扬学术民主 , 促进国际交流 , 为我国的经济建设和社会发展服务。

Water Science and Engineering 主要刊登反映国内外水科学研究和水工程建设领域重大科技成果和最新发展趋势的英文原创性科技论文 , 内容包括 : 大型水利工程建设、水电能源开发、跨流域调水、江河综合治理、地球水圈研究、水资源保护、水环境影响评价以及水生态修复等 ; 也刊登国内外相关学术会议及技术交流等动态信息。

编辑部地址 : 210098 南京市西康路 1 号河海馆 811 室 ; 投稿邮箱 : wse@hhu.edu.cn ; 咨询热线 : 025-83786363。

(*Water Science and Engineering* 编辑部供稿)

· 5 ·