

概率配点法在流域非点源污染不确定性分析中的应用

王伟明¹, 郑一¹, Arturo Keller²

(1. 北京大学工学院, 北京 100871; 2. Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara 93106, California, USA)

摘要:农业非点源污染的形势十分严峻,流域水环境模型虽能为非点源污染管理提供决策支撑,但显著的不确定性制约着模型的应用效果。系统的不确定性分析十分重要,而传统的基于 Monte Carlo 模拟的不确定性分析方法存在着计算成本高昂的缺点。因此,尝试将概率配点法(Probabilistic Collocation Method)应用于流域非点源污染的不确定性分析。研究以美国 Newport Bay 流域的二嗪磷农药非点源污染为案例,利用 WARMF 模型进行污染模拟。结果表明,在许多情况下,概率配点法可以通过很小的计算成本获得与传统 Monte Carlo 模拟方法相近的不确定性分析结果,体现出该方法在非点源污染研究中应用的优势。此外,还揭示了管理因素对于非点源污染模拟及其不确定性分析的影响作用。

关键词:概率配点法;非点源污染;二嗪磷;不确定性

中图分类号:X11 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)09-1750-07

Application of Probabilistic Collocation Method in the Uncertainty Analysis for Watershed Non-point Source Pollution Modeling

WANG Wei-ming¹, ZHENG Yi¹, KELLER Arturo²

(1.College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2.Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara 93106, California, USA)

Abstract: Agricultural non-point source pollution(NPSP) is now a severe problem. Watershed water quality models could provide decision supports for managing NPSP, but their efficiency is limited by significant uncertainty involved in the simulation. Current uncertainty analysis techniques are mainly based on Monte Carlo Simulation(MCS), which are usually associated with high computation costs. In this study, the Probabilistic Collocation Method(PCM) was used to analyze the uncertainty in watershed NPSP modeling. The Diazinon pollution in Newport Bay watershed(USA) was chosen as the case study, and the WARMF model was used. It has been shown that, in many cases, PCM could achieve good uncertainty results comparable to those by traditional MCS, with a much less computational cost. It has also been revealed that management factors could have significant impact on the NPSP modeling and its uncertainty analysis.

Keywords: probabilistic collocation method; non-point source pollution; diazinon; uncertainty

在发达国家,非点源污染(也称面源污染)已超越点源污染成为水环境的首要威胁,其中农业非点源污染是主要的形式^[1]。我国农业非点源污染的形势也十分严峻^[2],其中农药污染问题尤其需要引起关注。据报道^[3],我国的太湖流域农药用量达 50 000~80 000 t·a⁻¹,约有一半残余物最终流入湖中。近些年来,流域水环境模型(如 SWAT、HSPF 和 WARMF 等)在非点源

污染领域得到了应用^[4-6]。此类模型考虑污染的具体机理,进行动态、分布式的水文和水质模拟。由于模型结构复杂、数据需求繁多,模拟结果通常具有显著的不确定性^[7]。因此,只有进行系统的不确定性分析,流域水环境模型才能有效支撑非点源污染的管理工作^[8]。

流域非点源污染模拟的不确定性分析是国际学术界的热点和难点问题。基于蒙特卡罗模拟(Monte Carlo Simulation,简称 MCS)的各种不确定性方法是目前主流的选择^[8-10]。由于流域水环境模型运算时间较长,使 MCS 的计算成本变得十分高昂,如何降低计算成本成为一个难点问题。一种思路是为复杂的流域水环境模型找到一个简化的替代模型(亦称响应面, response surface),然后在替代模型的基础上进行

收稿日期:2010-04-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50909001,50911130509);教育部科学技术研究重点项目(308001)

作者简介:王伟明(1983—),男,河南洛阳人,在读硕士,主要从事非点源污染模拟的研究。E-mail:wangweiming@pku.edu.cn

通讯作者:郑一 E-mail:yizheng@coe.pku.edu.cn

不确定性分析。概率配点法(Probabilistic Collocation Method, 简称为 PCM)是一种随机响应面方法^[11], 因其计算成本低且易于黑箱模型, 近年来在地下水模拟等领域得到应用^[12-14], 取得了较好的效果。Cryer 等^[15]还将 PCM 用于田间尺度农药污染模型的不确定性分析。目前, 尚未有研究讨论 PCM 能否有效用于流域尺度的非点源污染模拟。本文以美国 Newport Bay 流域二嗪磷(Diazinon)农药非点源污染为研究案例, 系统分析 PCM 方法对于流域水环境模型 WARMF 的应用效果, 并在此基础上揭示不确定性分析对于流域非点源污染模拟和管理的重要意义。

1 材料与方法

1.1 概率配点法简介

概率配点法(PCM)是一种加权残差法, 它在已知参数概率分布的基础上, 以 Hermite 多项式为基函数, 通过基函数的加权组合构成一个多项式来代替原模型。由于替代模型是多项式, 其计算成本低廉, 便于进行基于 MCS 的不确定性分析。PCM 方法的基本流程如图 1 所示。

以下介绍 PCM 方法中的几个关键步骤。

1.1.1 多项式混沌展开

PCM 将原模型任一输出变量 y 表示成独立同分布的标准正态变量 $\{\xi_i\}_{i=1}^n$ 的多项式混沌展开^[13]:

$$y = a_0 + \sum_{i_1=1}^n a_{i_1} \Gamma_1(\xi_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} a_{i_1 i_2} \Gamma_2(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} a_{i_1 i_2 i_3} \Gamma_3(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \xi_{i_3}) + \dots \quad (1)$$

其中

$$\Gamma_p(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_p}) = (-1)^p e^{\frac{1}{2} \xi^T \xi} \frac{\partial_p}{\partial \xi_{i_1} \partial \xi_{i_2} \dots \partial \xi_{i_p}} e^{-\frac{1}{2} \xi^T \xi}$$

是关于 $\{\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_p}\}$ 的 p 阶 Hermite 多项式。式中的系数 a_i 待求。通常情况下, 截取多项式混沌展开中的前几项即可以获得对于 y 的较理想的近似。例如, 包含两个随机变量, 自由度(即随机变量的阶数的最大值)为 2 的混沌展开式可表示如下:

$$y = a_0 + a_1 \xi_1 + a_2 \xi_2 + a_3 (\xi_1^2 - 1) + a_4 (\xi_2^2 - 1) + a_5 \xi_1 \xi_2 \quad (2)$$

研究显示^[14], 混沌展开的自由度越高, 作为替代模型的混沌展开多项式就越接近原模型。对于 n 个随机变量的自由度为 d 的混沌展开, 共有 C_{n+d}^d 个未知系数。可见, 随着自由度 d 的增加, 未知系数的个数快速增长, 求解系数所需的方程个数也随之快速增加, 则计算成本会显著增加。因此, 一般应用中常取 $d=2$, 只有当 $d=2$ 的混沌展开不能满足精度要求时才考虑更高阶的混沌展开^[16]。

1.1.2 配点选取

若在参数空间上取 C_{n+d}^d 个配点, 让混沌展开式在这些配点上与原模型输出相等, 则可建立线性方程组以求解未知系数。以 $n=2, d=2$ 为例:

$$\begin{cases} y_1 = a_0 + a_1 \xi_{1,1} + a_2 \xi_{2,1} + a_3 (\xi_{1,1}^2 - 1) + a_4 (\xi_{2,1}^2 - 1) + a_5 \xi_{1,1} \xi_{2,1} \\ y_2 = a_0 + a_1 \xi_{1,2} + a_2 \xi_{2,2} + a_3 (\xi_{1,2}^2 - 1) + a_4 (\xi_{2,2}^2 - 1) + a_5 \xi_{1,2} \xi_{2,2} \\ \vdots \\ y_N = a_0 + a_1 \xi_{1,N} + a_2 \xi_{2,N} + a_3 (\xi_{1,N}^2 - 1) + a_4 (\xi_{2,N}^2 - 1) + a_5 \xi_{1,N} \xi_{2,N} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $(\xi_{1,i}, \xi_{2,i})$ 代表第 i 个配点。

配点的选取在随机变量取自由度更高一阶的 Hermite 多项式的根时效果最优^[17], 根据这一原理, 共可选取 $(d+1)^n$ 个配点, 但当 n 较大时, $(d+1)^n > C_{n+d}^d$ 。Isukapalli^[18]提出了进一步筛选配点的 ECM 方法。在 ECM 方法中, 可针对展开式中的每一项确定一个配点。例如, 展开式中某一项含有 $\{\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_p}\}$ 共 p 个随机变量, 则对应于该项的 ECM 配点应具有以下特征: 在该配点内, 对于任意的 $\xi \in \{\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_p}\}$, 取 $\xi = 0$; 对于其他随机变量, 取比混沌展开自由度高一阶的 Hermite 多项式的根(不唯一, 任取一个)。通过 ECM 方法选取的配点, 其数目等于待求系数个数, 且最接近标准正态参数空间的原点, 其意义在于: ECM 尽可

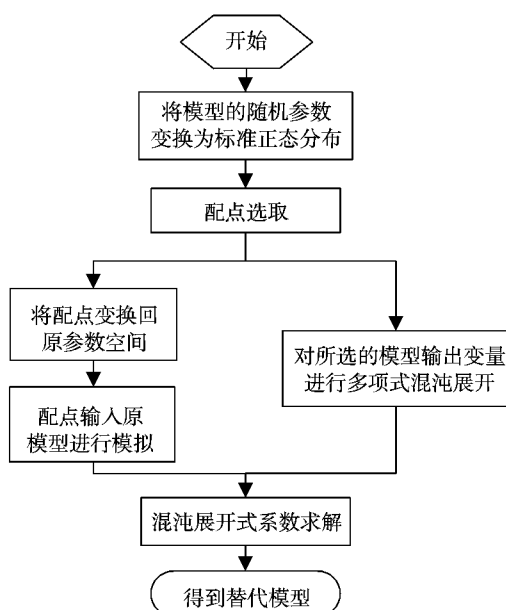


图 1 PCM 方法流程图

Figure 1 Flowchart of PCM

能选取参数空间中概率密度较大的点,从而提高混沌展开式的近似效果。

利用 ECM 配点即可求得式(3)中的待定系数。如果把由此确定的混沌展开式视为参数空间上的一个响应面,则该响应面在配点上与原模型输出结果完全一致,但在配点以外的区域可能存在较大差异。为了进一步获得较高的精度,可以使用基于回归的 PCM 方法^[18]:首先,选取多于待求系数个数的 ECM 配点,从而获得一个超定线性方程组;然后,通过回归求解这些系数。在 PCM 框架之下,因变量(即模型输出 y)和自变量(即随机参数)都是随机变量,因此需采用奇异值分解回归(称之为 SVD 方法)。虽然通过该方法获得的响应面在配点处不再与原模型输出完全一致,但由于利用了更多配点的信息,可以在参数空间内更广的区域上取得比 ECM 方法更优的近似结果。

1.1.3 随机参数分布变换

PCM 方法直接处理的是互相独立的标准正态变量。实际应用中,原模型的随机参数通常并不符合上述前提,这就需要先进行参数变换成独立标准正态分布,然后再针对变换后的随机参数进行混沌展开和配点选取。在配点选取之后,需先将配点变换回原来的参数空间,再代入原模型,求出相应的 y 值用于建立线性方程组。例如,对于一个在 $[a, b]$ 上均匀分布的随机变量 x ,可用下式变换:

$$x = a + (b - a) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \xi \right) \right] \quad (4)$$

其中 $\operatorname{erf}()$ 代表误差函数。

1.2 研究区概况

Newport Bay 流域位于美国加利福尼亚州 Orange 县境内,流域面积约 399 km²,属典型的地中海式气候,全年平均降雨量为 330 mm,主要集中在 11 月至 4 月间。流域内主河道为 San Diego Creek,其径流量占进入 Newport Bay 总量的 95%。该流域农业生产发达,同时又具有相当规模的城市面积,具体的土地利用分布可参见图 2。

该流域人口密集,同时又是许多濒危鸟类和鱼类的栖息地。由于当地在农业和城市园艺中广泛使用二噻磷(Diazinon)农药,曾造成流域内较为严重的二噻磷非点源污染。2002 年以后,为了保护当地水环境,降低生态风险,美国环保局开始逐步限制二噻磷在该流域的使用。同时,州政府组织人力物力,进行了流域 TMDL(Total Maximum Daily Load)规划,旨在全面防治二噻磷的非点源污染。由于农药非点源污染的复杂

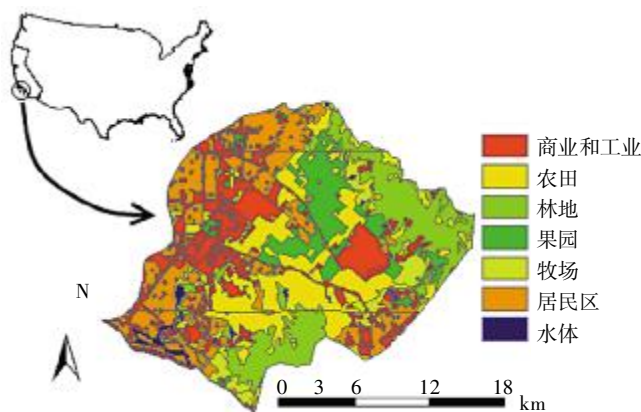


图 2 Newport Bay 流域的地理位置和土地利用

Figure 2 Location and land use of Newport Bay watershed

性,有效的数学模拟可以为规划和管理工作提供有效支撑。Zheng 等^[6]利用 WARMF 模型对该流域 1997 年至 2003 年间二噻磷的非点源污染进行了动态的、分布式的模拟,并对模拟的不确定性进行了分析。

1.3 Newport Bay 流域二噻磷非点源污染模拟

本研究将利用 Zheng 等^[6]所建立的新port Bay 流域二噻磷非点源污染 WARMF 模型^[19],进行 PCM 方法的应用。WARMF 是由美国 EPRI 资助开发的用于流域非点源污染模拟和管理的分布式水文、水质模型。该模型将流域划分成子流域、河段和湖泊单元,在每个单元内部采用集总参数的水质模拟方法。模型考虑了大气沉降、点源排放、灌溉、施肥等各类污染源,可进行泥沙、各类化学物质及大肠杆菌的污染模拟。WARMF 模型还具有流域水质管理规划的决策模块。在美国 Catawba River^[20], Holston River^[21], Turkey Creek^[22]等流域,以及我国的巢湖流域^[23-24]都得到过成功应用。在 Zheng 等^[6]及本次研究中,Newport Bay 流域被划分为 4 个子流域,如图 3 所示。

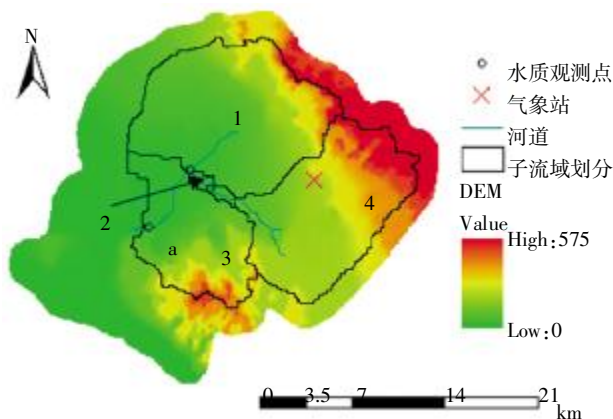


图 3 子流域划分

Figure 3 Watershed delineation

1.4 数值实验

参考以前的研究结果^[6,25],本次 PCM 分析选取了吸附系数、二噁磷降解速率、负荷量不确定性因子等敏感性参数,加上对于参数空间变异性的考虑,总共分析了 19 个独立的随机参数(表 1)。参照先前研究,假设参数均为均匀分布,取值范围见表 1。

表 1 不确定性分析所考虑的随机参数

Table 1 Parameters considered in the uncertainty analysis

随机参数	子流域	范围	单位
降雨权重因子	1	0.91~0.95	
降雨权重因子	2,4	0.93~0.97	
降雨权重因子	3	0.98~1.02	
土层 1 厚度	1	160~240	cm
土层 1 厚度	3	80~120	cm
土层 1 厚度	2,4	80~120	cm
不透水面积比率,居民区	全部	0.3~0.5	
不透水面积比率,工商业区	全部	0.6~0.8	
街道清扫效率	全部	60~80	%
流域内农药降解速率	全部	0.1~0.16	d ⁻¹
土壤中农药的吸附系数	全部	5~15	kg ⁻¹
底泥中农药的扩散率	全部	0.000 5~0.001 5	m ² ·d ⁻¹
水体中农药降解速率	全部	0.08~0.14	kg ⁻¹
底泥中农药降解速率	全部	0.08~0.14	kg ⁻¹
底泥中农药初始含量	全部	0~0.000 04	mg·g ⁻¹
底泥中农药吸附系数	全部	5~15	kg ⁻¹
河道初始水位	全部	0.1~0.4	m
二噁磷施用量不确定性因子,居民区	全部	0.7~1.3	
二噁磷施用量不确定性因子,农田	全部	0.7~1.3	

本研究中 WARMF 模型的运行期为 1997 年 9 月 1 日至 2001 年 12 月 31 日,共 1 583 d,模型直接的输出变量是流域出口处(图 3 中 a 点)的河道二噁磷逐日浓度。在 PCM 分析中,还将由逐日浓度间接推出的“超标天数”和“长期平均浓度”作为模型输出变量考虑。在计算“超标天数”时,选取二噁磷的 Criteria Maximum Concentration(CMC)作为标准,数值为 80 ng·L⁻¹。CMC 是当地二噁磷污染管理实践中最常用的标准,超过这一标准水生生物可能会产生急性毒理反应。“长期平均浓度”则取整个模拟期内浓度的平均值,该变量间接体现了二噁磷输出负荷量的状况。

对输出变量进行二阶混沌展开,并应用 SVD 方法求解 $C_{9,2}^2=210$ 个混沌展开式系数。具体做法如下:选取 300 个 ECM 配点,将其变换回原参数空间后输入 WAMRF 模型运算;所得的 300 组配点和相应的 WARMF 模型运算结果输出可用于建立超定方程组;

应用 SVD 方法求得 210 个系数,最终建立原 WARMF 的替代模型(即混沌展开式所代表的响应面)。本次研究对 CMC 超标天数、长期平均浓度和单日浓度等输出变量分别进行了上述分析。

为检验 PCM 方法的应用效果,对所建立的替代模型进行了两方面检验:第一,在参数空间随机选取一定数量的点(非原始配点),分别用 WARMF 和替代模型进行模拟,据两种模拟结果作散点图,如果散点贴近于 45°线,则表明替代模型的近似效果良好;第二,对 WARMF 和替代模型分别进行 10 000 次 MCS,进而推求输出变量的概率分布,分析两种情况下输出变量概率分布的差异。

2 结果与分析

2.1 CMC 超标天数

图 4 显示的是以 CMC 超标天数为输出变量的对比结果,其中散点图包含 300 个随机参数采样点,累积概率曲线则基于 10 000 次采样的 MCS。从散点图可见,PCM 替代模型和 WARMF 模型的模拟结果吻合较好($R^2=0.83$)。而从累积概率曲线来看,二种情况下 CMC 超标天数的概率分布也非常接近,只是在两端存在偏差。偏差的原因在于:PCM 为保证收敛,所用配点主要集中在标准正态分布中概率密度较大的区间(即分布的中间区域),因此在这一区域内 PCM 替代模型可以较好地重现原模型输出的概率分布。但是在参数概率密度很小的区域(即分布的两端),由于缺少配点的支持,替代模型的结果与原模型存在一定差异。这与他人的研究结果也是吻合的^[15,26-27]。

2.2 长期平均浓度

对 1 583 d 的平均浓度采用与前面相同的 PCM 分析,结果见图 5。总体来看,PCM 方法的应用效果尚可($R^2=0.89$),但概率分布的近似程度略逊于 CMC 超标天数的情况,主要体现在方差偏小。

2.3 单日浓度

为了对 PCM 方法的应用效果进行更为全面的检验,以单日的二噁磷浓度为输出变量进行同样的 PCM 分析。结果发现,在模拟期的 1 583 d 中,96%的情况下单日浓度的替代模型模拟值与 WARMF 模拟值的 R^2 超过 0.8,仅有 49 d 的 R^2 低于 0.5。通过分析发现,对于这 49 d,原模型(WARMF)模拟值的方差很大,是影响 PCM 方法效果的主要原因。

利用 1 583 d 逐日浓度的替代模型,可通过 10 000 次 MCS 得到模拟期内二噁磷浓度的置信区间,图 6

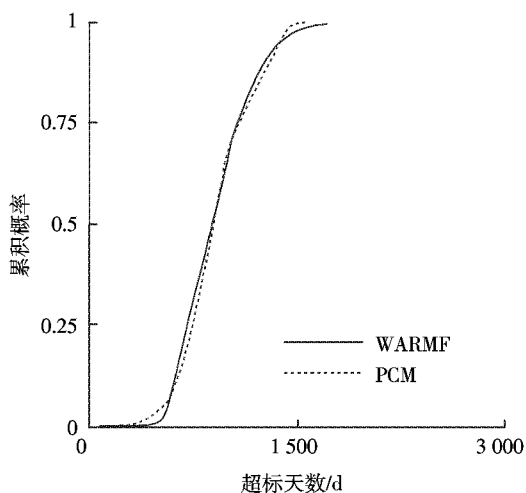
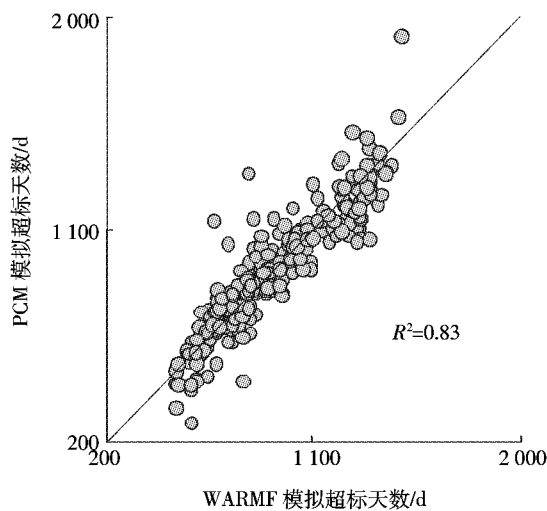


图4 CMC 超标天数模拟效果对比图

Figure 4 Comparison results for days exceeding CMC

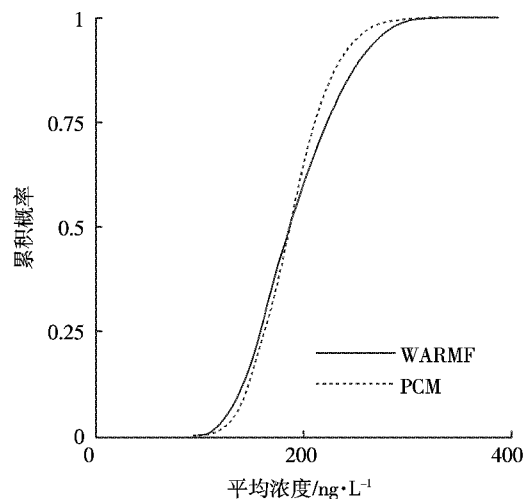
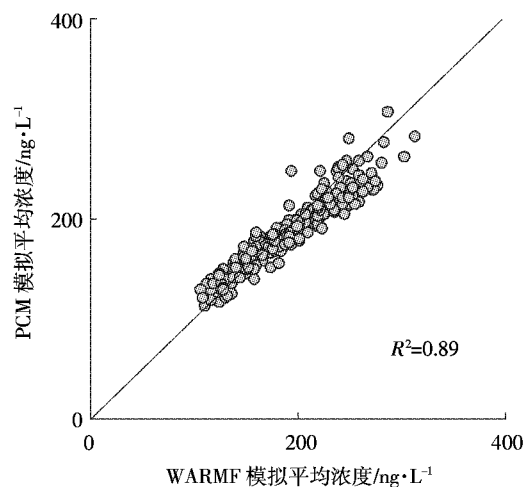


图5 平均浓度模拟效果对比图

Figure 5 Comparison results for mean concentration

显示了基于 PCM 方法的 2001 年逐日浓度 90% 置信区间,其中置信区间下方的曲线代表的是该置信区间和由 WARMF 生成的置信区间(通过对 WARMF 所做 10 000 次的 MCS)的宽度差异。由图可见:首先,基于 PCM 的随机模拟可以较好地替代基于 WARMF 的随机模拟,仅在个别时点存在较大误差,因而极大地节省了随机模拟的成本;其次,本次研究中,基于 PCM 的随机模拟结果较好地涵盖了实际浓度观测值。

3 讨论

前述研究结果体现出 PCM 方法在流域非点源污染模拟和管理应用中的优势。图 6 表明,PCM 替代模型的随机模拟结果能很好地近似 WARMF 模型的结果。从图 4 累积概率曲线的比较可看出,在 10%~90% 的累积概率区间,利用 PCM 计算获得的概率结果均

能较好地替代 WARMF 的结果,从而能够确保管理决策不会因为替代模型的使用而产生显著的偏差。本研究中 PCM 方法的计算成本主要是 300 次 WARMF 模型运算(替代模型 MCS 的成本几乎可忽略不计),相对于 10 000 次 WARMF 模型的 MCS,PCM 方法的应用使得在给出合理结果的前提下极大地减少了计算成本。

为进一步降低计算成本,有研究^[15]提出可以忽略混沌展开式中随机变量的交叉项($\xi_i \xi_j, i \neq j$)。本研究进行了二阶展开条件下忽略交叉项的 PCM 分析,但效果并不理想。其主要原因在于,影响流域农药非点源污染的随机因素众多,且相互作用复杂,交叉项能在一定程度上表征随机因素间的相互作用,因此在二阶展开条件下有必要保留交叉项以确保 PCM 方法的有效性。

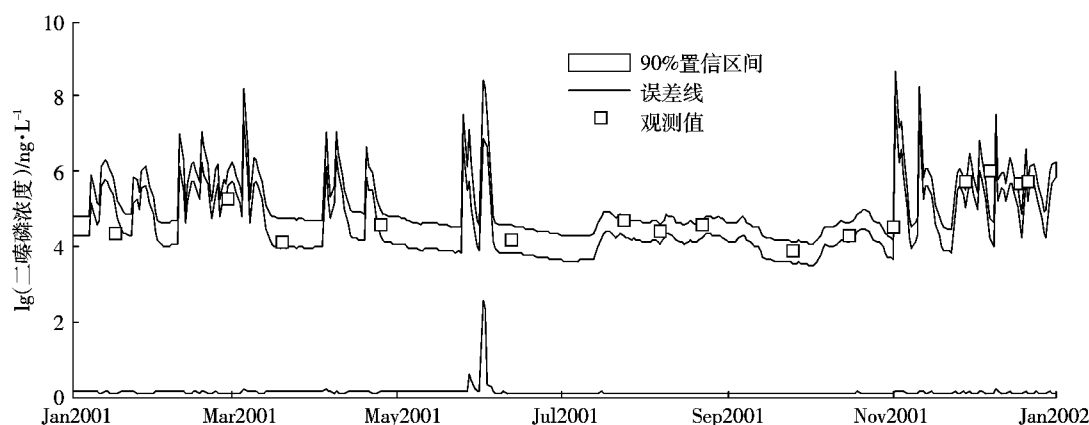


图6 2001年二嗪磷逐日浓度随机模拟结果

Figure 6 Stochastic simulation of daily diazinon concentration in 2001

从对比结果可见,使用PCM方法会导致输出变量方差偏小,主要体现在输出变量概率分布的首、尾两端的近似效果相对较差。这一缺陷是由配点选取方法本身所导致的。未来研究需考虑如何进行方法的改进和创新。

研究结果还表明,PCM方法在非点源污染模拟中的有效性不单取决于污染本身的特征和所选流域水环境模型的数学结构,还与污染管理的具体目标以及管理决策所需的置信水平等因素有关。一个重要的启示是,在进行流域非点源污染研究时,不应将数学模拟和管理决策这两部分工作内容割裂开来,而应相互整合,同时考虑。

需要注意的是,基于PCM方法的不确定性分析,直接针对的是参数的不确定性,对于其他来源的不确定性(如模型结构不确定性、模型输入数据误差、观测值误差等)不能直接分析。一种可行的策略是通过构建误差模型将其他类型的不确定性转化为参数不确定性后,再纳入PCM分析框架。

4 结论

本研究首次将概率配点法(PCM)用于流域农药非点源污染的不确定性分析和随机模拟,获得了较好的效果。所得结论主要包括以下几方面:

(1)本研究中,利用PCM方法所建立的替代模型可较好近似WARMF。由于流域农药非点源污染模拟的复杂程度高,随机因素间的交互关系显著,混沌展开式中的交叉项不应省略。

(2)在二阶混沌展开的情况下,将PCM方法用于流域非点源污染的随机模拟,可以以较小的成本获得较为合理的结果。

(3)PCM方法在非点源污染模拟中的有效性与管理目标、管理决策所需的置信水平等因素密切相关。因此,在进行流域非点源污染研究时,须将数学模拟和管理决策整合起来,统筹考虑。

(4)现有的PCM方法受算法本身所限,存在着一些无法完全克服的缺陷。未来研究可考虑如何进行PCM方法的改进或同类方法的创新。

中国的农药非点源污染问题十分严重,但目前分布式的流域模拟工作还不多,不确定分析的研究更少见,现有的工作成果远不能满足环境管理的需求。未来的研究工作可侧重于以下几个方面:在成功移植国外先进数学模型的基础上进行创新;基于中国流域的特点,展开系统的非点源污染不确定性分析;研究如何在显著的不确定性条件下,进行流域非点源污染管理的有效决策。

参考文献:

- [1] U. S. Environmental Protection Agency. 2000 National Water Quality Inventory[R], Washington, D. C. : U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 2002.
- [2] 朱兆良, 诺斯, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
ZHU Zhao-liang, NORSE D, SUN Bo. Policy for reducing non-point pollution from crop production in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [3] 胡星明. 中国农业非点源污染[J]. 安徽教育学院学报, 2006, 24(6): 80-82.
HU Xing-ming. Non-point source pollution in China agriculture[J]. Journal of Anhui Institute of Education, 2006, 24(6): 80-82.
- [4] 杨菁荟, 张万昌. SWAT模型及其在水环境非点源污染中的应用研究进展[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 260-266.
YANG Jing-hui, ZHANG Wan-chang. Research progress on SWAT

- model and its application on water environmental nonpoint source pollution[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(5):260-266.
- [5] 梅立永, 赵智杰, 黄 钱, 等. 小流域非点源污染模拟与仿真研究——以 HSPF 模型在西丽水库流域应用为例[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1):64-70.
- MEI Li-yong, ZHAO Zhi-jie, HUANG Qian, et al. Non-point sources pollution modeling in watershed scale; Case study of Xili Reservoir (Shenzhen) with HSPF[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):64-70.
- [6] Zheng Y, Keller A A. Stochastic watershed water quality simulation for TMDL development: A case study in Newport Bay watershed[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(6):1397-1410.
- [7] 张 巍, 郑 一, 王学军. 水环境非点源污染的不确定性分析方法[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4):1290-1296.
- ZHANG Wei, ZHENG Yi, WANG Xue-jun. Review on uncertainty analysis methods for non-point sources pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1290-1296.
- [8] Zheng Y, Keller A A. Uncertainty assessment in watershed-scale water quality modeling and management:1. Framework and application of Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) approach[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(8):W08407.
- [9] Sohrabi T M, Shirmohammadi A, Chu T W, et al. Uncertainty analysis of hydrologic and water quality predictions for a small watershed using SWAT 2000[J]. *Environmental Forensics*, 2003, 4(4):229-238.
- [10] Zheng Y, Keller A A. Uncertainty assessment in watershed-scale water quality modeling and management:2. Management Objectives Constrained Analysis of Uncertainty (MOCAU)[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(8):W08408.
- [11] Isukapalli S S, Roy A, Georgopoulos P G. Stochastic response surface methods (SRSMs) for uncertainty propagation: Application to environmental and biological systems[J]. *Risk Analysis*, 1998, 18(3):351-363.
- [12] 史良胜, 蔡树英, 杨金忠. 三维地下水流随机分析的配点法[J]. *水利学报*, 2010, 41(1):47-54.
- SHI Liang-sheng, CAI Shu-ying, YANG Jin-zhong. The collocation method for stochastic analysis of three-dimensional groundwater flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(1):47-54.
- [13] Shi L S, Yang J Z, Zhang D X, et al. Probabilistic collocation method for unconfined flow in heterogeneous media[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(1-2):4-10.
- [14] Li W X, Lu Z M, Zhang D X. Stochastic analysis of unsaturated flow with probabilistic collocation method[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(8):W08425.
- [15] 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*, 2003, 20(3):169-181.
- [16] Cryer S A, Applequist G E. Direct treatment of uncertainty: I: Applications in aquatic invertebrate risk assessment and soil metabolism for chlorpyrifos[J]. *Environmental Engineering Science*, 2003, 20(3):155-167.
- [17] Villadsen J, Michelsen M L. Solution of differential equation models by polynomial approximation[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1978.
- [18] Isukapalli S S. Uncertainty analysis of transport-transformation models [D]. New Brunswick; Rutgers, The State University of New Jersey, 1999.
- [19] System Engineering. Watershed Analysis Risk Management Framework (WARMF): Update One: A decision support system for watershed analysis and Total Maximum Daily Load calculation, allocation and implementation[R]. Palo Alto, California: EPRI, 2001.
- [20] Eisen-Hecht J I, Kramer R A. A cost benefit analysis of water quality protection in the Catawba Basin[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2002, 38(2):453-465.
- [21] Chew C W, Herr J, Goldstein R A, et al. Watershed risk analysis model for TVA's Holston River basin[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1996, 90(1-2):65-70.
- [22] Geza M, Poeter E P, McCray J E. Quantifying predictive uncertainty for a mountain-watershed model[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(1-2):170-181.
- [23] 蒋 颖, 王学军, 罗定贵. 流域管理模型的参数灵敏度分析——以 WARMF 在巢湖地区的应用为例[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(3):165-168.
- JIANG Ying, WANG Xue-jun, LUO Ding-gui. Parameters sensitivity analysis of watershed management model: Application of WARMF model in Chaohu Lake area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(3):165-168.
- [24] 罗定贵, 张 巍, 郑 一, 等. 基于 WARMF 模型的杭埠-丰乐河流域水文模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(8):1391-1401.
- LUO Ding-gui, ZHANG Wei, ZHENG Yi, et al. Evaluation of the WARMF model for hydrologic simulation in the Hangbu-Fengle River watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(8):1391-1401.
- [25] ZHENG Y, Keller A A. Understanding parameter sensitivity and its management implications in watershed-scale management water quality modeling[J]. *Water Resources Research*, 2006, 44(6):1397-1410.
- [26] HUANG S P, Mahadevan S, Rebba R. Collocation-based stochastic finite element analysis for random field problems[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2007, 22(2):194-205.
- [27] Phenix B D, Dinero J L, Tatang M A. Incorporation of parametric uncertainty into complex kinetic mechanisms: Application to hydrogen oxidation in supercritical water[J]. *Combustion and Flame*, 1998, 112(1-2):132-146.