

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM₁₀ 中元素浓度特征和来源分析 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO₃⁻/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO₂、CH₄ 排放通量的短期影响 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则(4462) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

环境模型中敏感性分析方法评述

陈卫平¹, 涂宏志^{1,2}, 彭驰¹, 侯鹰¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 模型本身及其参数的不确定性使其模拟结果的可靠性备受争议, 科学地认识模型的不确定性并对其进行定量的评价一直是环境模型研究的前沿, 也是环境模型构建和应用过程中不可缺少的环节. 通过敏感性分析, 研究模型输入参数的变化对模型输出结果的影响程度, 有助于了解并简化模型结构、提高参数率定效率、增进模型精度并增加模型应用的可靠性. 本研究总结了敏感性分析在环境模型中的作用, 并对常见的敏感性分析方法的原理、应用范围和优缺点进行了综述. 最后, 阐述了敏感性分析在环境模型模拟决策中应用的现状和未来研究方向.

关键词: 环境模型; 不确定性; 敏感性分析; 局部敏感性; 全局敏感性

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4889-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201704121

Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models

CHEN Wei-ping¹, TU Hong-zhi^{1,2}, PENG Chi¹, HOU Ying¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Environmental models have been regarded as a key method to study the complex conditions of environmental systems. Sensitivity analysis (SA) is a vital step, which aims to investigate the impact of model inputs on model outputs. During the application of environmental models, SA plays a significant role in simplifying the model structure and improving the precision and reliability of the simulation. Consequently, identification and analysis of sensitivity parameters in environmental models is an important issue. This paper provides an introduction to the functions of SA in environmental models. Mathematical theories and methods used for SA are summarized, and their applications, advantages, and limits. On this basis, development trends for the use of SA for environmental models are proposed.

Key words: environmental model; uncertainty; sensitivity analysis; local sensitivity; global sensitivity

模型是为了特定目的而根据研究对象特有的内在规律, 做出一些必要的简化假设, 运用适当的数学工具得到的原型替代物^[1]. 模型有助于人们理解复杂系统, 并对不同情景模拟下的管理决策进行评估^[2]. 环境模型是研究复杂环境系统的重要工具, 在土地利用、气候变化情景分析、洪水预报、水质管理和环境健康风险评价、污染物在环境中的迁移转化与风险等方面均有应用^[3]. 由于环境模型需要对环境系统进行概念化和抽象化, 进而采用经验性的数学公式或物理方程描述各种环境系统的行为, 往往存在“失真”现象, 经验参数的定义和获取充满不确定性^[4,5]. 随着对环境系统认识的加深, 环境模型愈趋复杂^[6]. 复杂模型虽然能更好的模拟真实系统过程, 但其所需参数也越来越多, 参数获取困难, 导致参数不确定性增加, 模型输出误差也随之增加. 因此, 研究模型输出对输入参数的敏感性极为必要.

在环境模型的构建和应用中引入敏感性分析能够确定敏感参数、帮助数据挖掘和情景设置、降低模型模拟的误差水平, 从而提供更好的辅助决策支持. 因此敏感性分析成为了环境模型研究的前沿和

热点, 已经成为现代环境模型应用过程中必不可少的环节.

一些学者就某一类型环境模型敏感性分析方法开展了综述研究^[7,8], 其研究侧重于介绍各种敏感性分析方法的数学原理以及在模型中的应用, 而没有阐明敏感性分析方法在模型应用中的具体作用. 另一方面, 尽管不同环境模型结构不同, 研究的问题不同, 但其敏感性分析方法是类似的, 也是可以互相借鉴的. 因此, 本文对敏感性分析在环境模型应用中的作用进行了总结, 并对常见的敏感性分析方法的原理、应用范围和优缺点进行了综述. 最后, 阐述了敏感性分析在环境模型模拟决策中应用的现状和未来研究方向, 以期为研究人员使用某一特定模型时根据敏感性分析的目标选用具体敏感性分析方法提供参考.

收稿日期: 2017-04-12; 修订日期: 2017-05-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07201-011-005, 2015ZX07206-006-02); 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-ZY-004)

作者简介: 陈卫平(1976~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为城市生态风险评估理论与方法、环境模型开发与应用, E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

1 敏感性分析概述

由于研究系统属性的可变性(如不同物种、气象条件、水文条件)及观察与实验室分析的不确定性,模型参数具有较大的变异性 and 不确定性. 敏感性分析是研究模型参数、初始条件和边界条件等输入的变化对模型输出的影响程度^[9]. 对于仅有少量参数的简单环境模型,模型输出与各参数呈线性响应关系,且参数间互不影响,因此可以快速分析各独立参数对模型输出的影响. 而随着模型结构复杂度增加,模型所需参数和状态变量随之增加. 模型输出与模型输入参数间可能存在非线性响应关系或者参数间存在相互作用,模型输入对模型输出的影响愈加难以定性或量化,从而敏感性分析难度也随之增加^[10]. 如图 1 所示,随着模型复杂性增加,模型敏感性亦增加,在保证各模型输入参数的准确性的前提下模拟结果的准确性也随之增加,但现实中往往由于各种原因难以保障一些参数的准确性甚至难以获取,因而,并非使用越复杂模型越好.

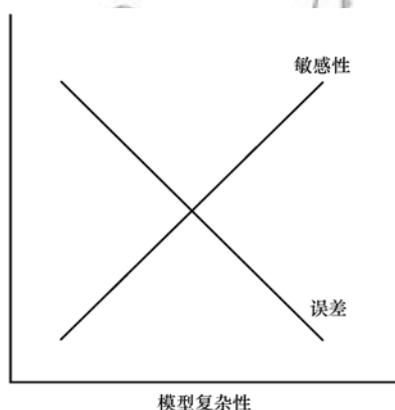


图 1 敏感性与模型复杂性关系^[10]

Fig. 1 Uncertainty-sensitivity relationship model

敏感性分析是环境模型构建及应用中不可缺少的环节,应贯穿于模型开发前、开发中以及开发后应用于特定问题的整个过程中^[11,12]. 敏感性分析的作用通常包括以下 7 个方面.

(1) 简化模型结构. 开展敏感性分析可以识别非敏感参数,从而将其固定为常量. 在一些结构复杂的环境模型中,由于模型参数众多且在多维空间表现出了复杂的相关性,可能会出现参数冗余现象. 而通过敏感性分析可以识别并移除这些冗余参数^[13].

(2) 提高参数率定的效率. 通过敏感性分析可以筛选出对模型输出贡献较大的敏感参数,再对这些敏感参数进行率定,从而可以减少率定过程的计

算量^[14,15].

(3) 分析模型输出不确定性与模型输入参数不确定性的关系,从而增加模型应用的可靠性^[16,17].

(4) 提高模型的精度. 敏感性分析能够筛选出不确定性较大的输入参数,而这有助于确认数据收集或实验(实地)研究的优先顺序,进而减少这些输入参数和模型输出的不确定性^[18,19].

(5) 用于确定环境过程中的关键影响因素,指导环境风险控制措施.

(6) 环境健康风险评估模型中,敏感性分析可用于确定主要环境污染物,识别主要暴露途径等关键因子^[20].

(7) 环境决策管理模型中,应用敏感性分析有助于决策者在综合考虑环境效应、经济效益和社会影响等因素下选择合适的决策^[21,22].

2 敏感性分析的数学方法

敏感性分析分为局部敏感性分析和全局敏感性分析^[23]. 局部敏感性分析是研究单个输入参数在局部范围内变化时对模型输出响应的影响. 最常见的局部敏感性分析方法是一次一个变量法(one-variable-at-a-time approach, OAT)和微分分析法(differential analysis, DA). 局部敏感性分析方法简单、计算量小、便于应用,但其缺点是无法充分描述模型参数的空间分布形态,并且忽略了参数之间的相互作用^[24]. 而全局敏感性分析研究的是多个模型变量同时变化对模型响应的影响,从而可以克服局部敏感性分析的缺点. 常用的全局敏感性分析方法包括回归分析法、Morris 筛选法、Sobol 方法、FAST 方法和 RSA 方法等.

2.1 一次一个变量法

一次一个变量法(one-variable-at-a-time approach, OAT)的基本原理是分别计算每个参数在其最佳估计值附近进行微小变化(如增减 10%)所导致模型输出的变化率,其变化率的绝对值代表了该参数的敏感性^[25]. 一次一个变量法方法简单、计算量小、便于应用,适合识别并筛选重要的参数. 但其缺点在于:① 目标参数的变化引起的输出结果的灵敏度大小依赖于模型其他参数值的选取,如果其他参数的基准值存在误差的话,则分析结果也将存在误差. ② 当模型输出对目标参数呈非线性响应时,则一次一个变量法无法有效揭示目标参数值变化对模型输出变化的影响. ③ 一次一个变量法也忽略了参数间的相互作用. ④ 无法分析目标参数在

更大取值范围的变化如何影响模型输出.

2.2 微分分析法

微分分析法(differential analysis, DA)首先将模型进行泰勒展开,然后根据泰勒展开式计算模型输出对目标参数的一阶偏微分函数值,则各参数的一阶偏微分函数值代表了该参数的敏感性^[26].微分分析法仅在模型局部可微的条件下适用,偏微分函数的计算难度大,需要特定的软件.

2.3 回归分析法

回归分析法(regression analysis, RA)通过随机采样生成参数样本序列,计算每个样本对应的模型响应,然后进行线性回归.建立多元线性模型^[27,28]:

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

式中, y 为模型响应, x_i 为模型参数, k 是变量数, ε 是误差项, b_i 为对应于 x_i 的线性回归模型系数,则可以用标准回归系数、皮尔逊相关系数、斯皮尔曼等级相关系数或偏相关系数等指标表示各参数的敏感性^[29,30].

回归分析法计算相对便捷,并且可以同时计算多个参数的敏感性.但是敏感性分析结果受回归模型本身的影响,如果回归模型由于参数变化范围过窄以致于没有产生明显的模型响应,则分析结果无法揭示真实情况^[31].此外,如果数据间呈现非线性关系或者参数间存在相互作用,分析结果也将与真实情况存在巨大误差.

2.4 Morris 筛选法

Morris 筛选法由 Morris 于 1991 年提出,随后经 Campolongo 等进行改进,是目前应用较广的一种全局敏感性分析方法^[32,33].Morris 筛选法的基本思想是选取模型中某一变量在整个变化范围内进行微小扰动,其他变量保持不变,评估该变量微小变化量引起的输出响应变化,即其提出的基效应概念.记 $y(x) = y(x_1, x_2, \dots, x_n)$,其中 x_i 为模型某一输入变量, $y(x)$ 为运行模型得到的目标函数, n 为参数个数,用 $d_i(j)$ 表示第 i 个参数第 j 组样本的基效应,则:

$$d_i(j) = (y^* - y) / \Delta_i$$

式中, y^* 为参数变化后的输出值; y 为参数变化前的输出值; Δ_i 为参数 i 的变幅; $j=1,2,\dots,t$ (t 为重复抽样次数).

则可以用 $d_i(j)$ 的修正后的均值 μ_i^* 和标准差 σ_i 来判断参数的敏感性:

$$\mu_i^* = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t |d_i(j)|$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{t-1} \sum_{j=1}^t [d_i(j) - \mu_i]^2}$$

式中, μ_i^* 表征参数的敏感度,确定参数的排序,其值越大,说明参数的敏感性越强; σ_i 表征参数之间的非线性效应或相互作用的强弱,其值越高,参数相互作用越强.Morris 筛选法结果可以用散点图表示, μ^* 为横坐标, σ 为纵坐标^[17].Morris 筛选法可以简单快速地筛选出敏感性高的参数,但无法量化这些参数对模型输出变化的影响.值得注意的是,Morris 筛选法形式上和一次一个变量法相似,但鉴于它可以最大化地研究参数空间,因此仍被视为一种全局敏感性分析方法^[34].

2.5 Sobol 方法

Sobol 方法最早由 Sobol 于 1993 年提出,其核心是将模型输出的总方差可分解为每个参数的方差和参数相互作用的方差之和,然后通过参数对输出方差的贡献比例进行敏感性分级^[35].假设模型 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, x_i 服从 $[0,1]$ 均匀分布,则有:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{i_1 < \dots < i_s} f_{i_1, \dots, i_s}(x_{i_1}, \dots, x_{i_s})$$

Sobol 证明了该分解式具有唯一性且每一分解项均可以通过多重积分求得. $f(x)$ 总方差为:

$$D = \int f^2(x) dx - f_0^2$$

偏方差为:

$$D_{i_1, i_2, \dots, i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 f_{i_1, i_2, \dots, i_s}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_1} \dots dx_{i_s}$$

其中 $1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq n$ 且 $s=1,2,\dots,n$.

则敏感度系数 S_{i_1, i_2, \dots, i_s} 为:

$$S_{i_1, i_2, \dots, i_s} = \frac{D_{i_1, i_2, \dots, i_s}}{D}$$

式中, S_i 为 x_i 的一阶敏感度指数,表示参数单独对模型输出的影响,也称为主要影响; S_{i_1, i_2, \dots, i_s} 叫做因素 $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_s}$ 的 s 阶敏感性指数,用于定量描述这 s 个参数共同作用于 $f(x)$.因此对于有 s 个参数的模型来说,变量 x_{i_1} 总敏感性指数 TS_{i_1} 可表示为:

$$TS_{i_1} = S_{i_1} + S_{i_1, i_2} + \dots + S_{i_1, i_2, \dots, i_s}$$

Sobol 方法不仅可以定性地分析不同模型参数敏感性程度,也可以定量地分析各参数的敏感性大小.但对于拥有大量参数的复杂环境模型而言,Sobol 方法需要消耗巨大的计算资源.此外,Sobol 方法没有考虑模型参数间的相关性^[36].

2.6 FAST 方法

FAST(fourier amplitude sensitivity test)理论来源

于傅里叶变换 (fourier transform) 和方差分析方法 (analysis of variance, ANOVA). FAST 通过计算指定参数造成的模型输出方差在整个模型方差中的贡献,来衡量参数的一阶敏感性^[37~39]. FAST 方法采样速度大于 Monte Carlo 方法,不受模型结构的影响,单调、非单调模型均可适用^[40]. 此外,FAST 方法对参数的变化范围没有限制,且优于一些基于相关系数和回归系数的全局敏感性分析方法^[41]. FAST 方法的缺点在于:①通常需要大量取样、计算资源消耗量大;②忽略参数间的相互作用影响,无法计算参数的高阶敏感性;③不适合计算离散参数的敏感性^[31]. 耦合 FAST 和随机平衡设计 (random balance design) 建立的 RBD-FAST 方法将所有参数设置成相同的频率,取样后做随机重组,模型输出的结果可以根据上一步重组的次序再做傅里叶分解,从而极大地减少了计算所需要的资源. 而由 Saltelli 等结合 Sobol 法和 FAST 的优点提出的 EFAST (extended fourier amplitude sensitivity test) 可以得到每个参数及参数的相互作用所引起的模型结构的方差,从而计算参数的高阶敏感性^[42].

2.7 RSA 方法

RSA 方法 (regional sensitivity analysis) 是由 Young 等于 20 世纪 70 年代末、80 年代初提出的^[43,44]. 其步骤为:①按照多元一致分布的原则在可行参数空间内利用蒙特卡罗采样生成参数集;②利用生成的参数进行模型模拟,并按照事先设定的条件,进行基于行为和行为的二元划分原则的参数识别;③利用 K-S 检验或者边缘累积分布函数

等方法判断参数对模型的影响程度^[45]. 参数的边缘累积分布离原始分布越远,则说明该参数对目标函数的影响越显著,其灵敏度越高^[46]. RSA 方法所需假设条件较少无需修改模型,分析结果直观,同时还具有参数识别的功能. 但是没有考虑参数间相互作用的影响,无法量化分析参数敏感性.

2.8 各敏感性分析方法综合比较

在以上总结的 7 种敏感性分析方法中,一次一个变量法 (OAT) 和微分法 (DA) 属于局部敏感性分析方法,回归分析法 (RA)、Morris 筛选法、Sobol 指标法、FAST、RSA 属于全局敏感性分析方法 (表 1). 就计算成本而言,一次一个变量法最为方便,微分法数学原理复杂且需要借助于特定软件计算,计算成本高. 回归分析法、Morris 筛选法、Sobol 指标法、FAST、RSA 使用过程中均需要利用蒙特卡罗法或者拉丁超立体采样等方法进行取样进行模拟,因此对计算资源的占用较大. 而这 5 种方法相互比较,则回归分析法、Morris 筛选法、RSA 的计算成本较低,FAST 次之、Sobol 指标法最高. 一次一个变量法以比率或百分比的形式度量敏感性,直观简单,但没有考虑参数间的相互作用,因而适合在参数较少的模型 (如经验模型或者半经验模型) 中寻找并研究重要参数对模型的影响. 回归分析法原理较为简单,可以用标准回归系数、皮尔逊相关系数、斯皮尔曼等级相关系数或偏相关系数等多种指标衡量参数敏感性. 回归分析法适合对参数重要性排名,寻找重要参数并进行参数校正,在环境风险评价、水文模型和大气模拟中均有应用. Morris 筛选

表 1 各敏感性分析方法综合比较

Table 1 Summary of sensitivity analysis methods discussed in this study

方法	优点	缺点	应用
OAT	简单、计算成本低,便于应用	不适用于非线性模型,无法计算高阶敏感性 ¹⁾	经验或半经验模型 (如环境风险评价) 对参数重要性排名、参数校正、
DA	适合筛选潜在重要参数	不适用于非线性模型,无法计算高阶敏感性,需要使用特定软件,计算成本高	参数重要性排名、识别潜在重要参数、参数校正
RA	相对简单、计算成本相对较低	不适用非线性模型,参数相互作用强时效果差,参数采样范围过窄时分析结果可能较差	参数重要性排名、模型校正、不确定性分析
Morris	适用于非线性模型,计算成本相对较低,便于应用,适合筛选潜在重要参数	无法定量分析敏感性	多参数条件下筛选潜在重要参数、模型校正、不确定性分析
Sobol	适用于非线性模型,可量化一阶/高阶敏感性,参数高度相互作用时效果显著	对样本量要求高,计算成本高,没考虑参数相关性	复杂模型 (如水文模型、生态模型) 的参数敏感性排名、参数相互作用对模型影响研究、参数校正、不确定性分析
FAST	适用于单调/非单调模型,计算成本相对较低,可量化一阶敏感性	不适合计算高阶敏感性,不适合离散参数,没考虑参数相关性	复杂模型 (如水文模型、生态模型) 的参数敏感性排名、参数相互作用对模型影响研究、参数校正、不确定性分析
RSA	所需假设条件较少无需修改模型,分析结果直观,适合筛选重要参数	无法计算高阶敏感性,无法量化敏感性,对于敏感性一般的参数识别能力弱,分析结果受参数采样空间的影响	复杂模型参数敏感性识别、参数校正、不确定性分析

1) 高阶敏感性指目标参数因与其他参数相互作用的部分对模型输出的影响

法结果可以用散点图的方式表达,直观明了。Morris 筛选法适合在结构复杂、参数众多的模型(如 AGNPS、SWAT 等水文模型)中进行初步敏感性分析筛选潜在重要参数进行进一步的分析,并对非敏感参数进行固定。Sobol 指标法和 FAST 均以参数对模型输出方差的贡献比例衡量敏感性,适合量化复杂模型中参数的敏感性,帮助模型选择、数据收集、模型校正和不确定性分析。

3 敏感性分析在环境模型中的应用

敏感性分析在环境模型中有着广泛的应用,可概括分析如下。

(1) 用于在环境风险评估中确定主要环境污染物、暴露途径,以及识别各风险因子对总风险的贡献大小。环境风险评估由于参数数量通常较少,参数间相互作用的可能性小,且多为经验或半经验性模型,因此多应用一次一个变量法和回归分析法等相对简单的敏感性分析方法。如杨彦等^[47]进行了电子废弃物拆解场多氯联苯的暴露评估研究,利用一次一个变量法对暴露源和暴露途径进行鉴定,发现体重、呼吸速率、实测参数食物摄食、皮肤接触表面积和污染物实测浓度是影响暴露的主要因素。Ligaray 等^[48]开发了耦合 SWAT 模型的流域尺度 PAHs 模型,对 Taehwa 流域多环芳烃暴露评估时,通过一次一个变量法分析识别了主要因素。回归分析法被广泛应用于不同空间尺度上多环芳烃的健康风险评价中,如 Li 等^[49]开展了上海油条中多环芳烃的终身致癌风险健康风险评价,并利用多元回归系数分析了不同参数对终身致癌风险模型输出的影响。Wu 等^[50]则借助于多元回归系数研究识别了全国范围内影响水源水和饮用水多环芳烃健康风险评价的主要参数。

(2) 用于确定环境过程中的关键影响因素,指导环境风险控制措施。Peng 等^[51]利用 PAM-HMs 模型对中国湖南省某地区稻田土壤中 Cd 污染情况进行了模拟,同时用一次一个变量法分析并揭示了影响该地区土壤 Cd 迁移转化及累积的重要参数。在此基础上,作者进一步总结了该地区土壤修复应关注的易受人为活动影响的重要参数。此外,一次一个变量法也常用于生命周期评价模型,通过找到对环境影响较大的阶段和主要环境影响,并提出相关建议,以期能够为降低研究对象生命周期过程的资源消耗和环境污染提供参考^[52~54]。Bouraoui^[55]对 PEARL 模型应用微分分析法和 Morris 筛选法进行敏感性分析发现农药降解性能比土壤水力性质具有更重要的影响。

(3) 模型改进优化:帮助模型选择、数据收集、模型校正和不确定性分析。这类应用常见于机制模型,且由于机制模型结构复杂、参数众多,因此这类应用中敏感性分析方法多为 Morris 筛选法、Sobol 方法和 RSA 方法等全局敏感性分析方法。其中, Morris 筛选法和 Sobol 方法被广泛用于众多复杂的水文模型。以 SWAT 模型为例,由于模型参数众多, Morris 筛选法被用于筛选出重要参数并进行校正^[56~58];另一方面, SWAT 模型由水文子模型、土壤侵蚀子模型和污染负荷子模型构成,模型结构异常复杂,当考虑结构化导致的参数相互作用对敏感性分析的影响时,则可应用 Sobol 方法开展了敏感性分析。如 Zhang 等^[59]基于 Sobol 方法的 SWAT 模型敏感性分析结果有助于理解 SWAT 的结构、参数校正和不确定性分析。除 Morris 筛选法和 Sobol 法外, RSA 方法和回归分析法也常用于识别分析模型重要参数。Sun 等^[60]开发水质模型用于澳大利亚 Moruya 流域 TN、TSS 等污染物负荷量模拟研究,同时用 RSA 方法分析模型重要参数并进行校正。黄金良等^[61]以厦门市小流域,基于蒙特卡洛随机采样和 RSA 方法,从参数的可识别性和灵敏度分析 2 个方面分析了城市径流模型 SWMM 模型参数的不确定性。李一平等^[62]利用水文模型 EFDC (environmental fluid dynamic code) 对太湖水动力过程进行了模拟评估,并利用线性、非线性回归模型识别分析了模型不同输出目标下的重要参数。除了众多全局敏感性分析方法,一次一个变量法作为局部敏感性分析方法,由于方法简单,计算成本低,在这类应用中也较为常见。例如,邹宗森等^[63]利用以篔簹污水处理厂生物滤池工艺为研究对象,构建该工艺的 BioWin 模型,基于实测数据,结合一次一个变量法 BioWin 模型进行校正。席庆等^[64]利用农业非点源污染模型 AnnAGNPS 模型对中田河流域氮磷负荷进行模拟,采用一次一个变量法分析了多个参数对水文水质结果的敏感性,分析结果对模型构建中的参数选取与校验调整具有直接参考价值。

(4) 验证模型的可靠性,洞察模型行为并证明模型结构的稳定性。Yang 等^[65]将斯皮尔曼秩相关系数用于多环芳烃(PAHs)致癌健康风险评价的参数敏感性分析,识别鉴定了敏感参数和非敏感参数,分析结果与前人的研究结果一致,进一步验证了模型的可靠性。李如忠等^[66]等利用 OTIS 模型解析暂态存储作用对于排水沟渠溶质传输规律的影响,运用一次一个变量法对模型参数进行敏感性分析,其

研究结果有助于洞察模型行为和证明模型结构的稳定性. 张质明等^[67]将 Sobol 方法应用于 WASP (The water quality analysis simulation program) 模型, 研究表明参数的相互作用对模型输出有着不可忽视的影响, 同时参数间的相关性会影响 Sobol 敏感性分析结果, 研究结果有助于理解复杂模型的行为.

(5) 研究模拟情景与结果的关系. King 等^[68]在城市水供给产量研究中, 利用 Morris 筛选法分析发现影响模型输出的主要参数随着情景改变而变化, 分析结果表明在不同情景下使用重复单一的气候序列估计供水产量将导致错误的模拟结果. Dejonge 等^[69]利用 CERES-Maize 模型对农业灌溉管理研究中, 应用 Morris 筛选法去除非影响参数, 然后应用 Sobol 方法研究了不同灌溉情景模拟下参数对结果的影响, 为模型在实际场景的应用提供了参考. Ahmed 等^[70]在基于 WMAM 模型的城市暴雨低影响开发实践模拟研究中, 利用一次一个变量法分析了不同情景模拟中影响模型的主要参数.

以上研究表明, 对于环境健康风险评价等经验或者半经验环境模型, 由于其参数较少, 参数相互影响小, 所以应用一次一个变量法和回归分析法等原理简单、计算成本低的方法便可得到可靠结果. 而对于机制性环境模型, 通常由于这类模型结构复杂、参数众多, 为防止参数相互作用对分析结果的影响, 则多应用全局敏感性分析方法. 其中, Morris 筛选法和 RSA 等侧重于定性分析参数敏感性, 虽考虑了参数的相互作用, 却无法量化这种作用, 因此适合快速筛选识别重要参数; Sobol 和 FAST 则可以量化参数间的相互作用, 适合定量分析参数敏感性, 但应用这类敏感性方法时需要考虑方法原理复杂性和计算成本高等因素. 总之, 实际研究中需要根据具体的模型和研究目标选择合适的敏感性分析方法.

4 问题与展望

(1) 环境模型已广泛应用于环境科学研究中, 而敏感性分析是环境模型应用不可缺少的环节. 每种敏感性分析方法均有各自的优缺点, 不存在一种方法明显优于别的方法. 局部敏感性分析方法简便、计算成本低, 适用于参数少的经验模型. 而对于假设简化较少、结构复杂参数众多的模型, 考虑到难以估量模型输出与模型输入是否存在非线性响应关系, 以及参数间是否存在相互作用, 这种情况下应进行全局敏感性分析. 不同全局敏感性分析方法的区别主要在于: ①能否量化模型输入对模型输出

的影响; ②能否计算参数相互作用对模型输出的敏感性; ③对计算资源消耗的大小. Morris 筛选法和 RSA 能够定性分析参数敏感性, 计算成本相对较低, 适合鉴定非敏感参数并将其固定, 同时可以识别潜在敏感参数并用于进一步的定量敏感性分析. 回归分析法、Sobol 方法和 FAST 则可以量化各参数或多个参数共同作用对模型输出的影响.

(2) 未来对敏感性分析的研究包括以下 4 个方面: ①当前常用的全局敏感性分析方法都是基于数理统计原理, 应探寻基于其他原理的敏感性方法. ②对于占用大量计算资源的全局敏感性分析方法, 寻找更优的算法以提高采样速度, 从而降低计算成本. ③FAST、Sobol 等基于方差的敏感性分析方法忽略了参数间的相关性对分析结果的影响, 这一点也应成为未来研究方向之一. ④开发集成各种敏感性分析方法的软件, 以降低模型使用者的门槛. ⑤在模型应用中, 应使用多个敏感性分析方法对比分析, 以提高模型结果的稳健性.

参考文献:

- [1] Giordano F R, Weir M D, Fox W P 著. 数学建模[M]. (第五版). 叶其孝, 姜启源, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [2] Fitz H C, Kiker G A, Kim J B. Integrated ecological modeling and decision analysis within the everglades landscape [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, **41**(S1): 517-547.
- [3] Nossent J, Elsen P, Bauwens W. Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, **26**(12): 1515-1525.
- [4] Song X M, Zhan C S, Kong F Z, *et al.* Advances in the study of uncertainty quantification of large-scale hydrological modeling system [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, **21**(5): 801-819.
- [5] 熊立华, 卫晓婧, 万民. 水文模型两种不确定性研究方法的比较 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2009, **42**(2): 137-142.
- [6] 刘毅, 陈吉宁, 杜鹏飞. 环境模型参数优化方法的比较 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(2): 1-6.
- [7] 田雨, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 水文模型参数敏感性分析方法研究评述 [J]. *水文*, 2010, **30**(4): 9-12, 62.
- [8] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 水文模型参数敏感性分析方法评述 [J]. *水利水电科技进展*, 2015, **35**(6): 105-112.
- [9] Baroni G, Tarantola S. A general probabilistic framework for uncertainty and global sensitivity analysis of deterministic models: a hydrological case study [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, **51**: 26-34.
- [10] Snowling S D, Kramer J R. Evaluating modelling uncertainty for model selection [J]. *Ecological Modelling*, 2001, **138**(1-3): 17-30.
- [11] Ascough II J C, Green T R, Ma L, *et al.* Key criteria and selection of sensitivity analysis methods applied to natural resource models [EB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.134.5105>, 2005.
- [12] Herman J D, Kollat J B, Reed P M, *et al.* Technical note: method of morris effectively reduces the computational demands of

- global sensitivity analysis for distributed watershed models [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**(7): 2893-2903.
- [13] Gan Y J, Duan Q Y, Gong W, *et al.* A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods; a case study with a hydrological model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, **51**: 269-285.
- [14] Vanuytrecht E, Raes D, Willems P. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, **51**: 323-332.
- [15] Zambrano-Bigiarini M, Rojas R. A model-independent particle swarm optimisation software for model calibration [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, **43**: 5-25.
- [16] Makler-Pick V, Gal G, Gorfine M, *et al.* Sensitivity analysis for complex ecological models-a new approach [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, **26**(2): 124-134.
- [17] Zhan C S, Song X M, Xia J, *et al.* An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, **41**: 39-52.
- [18] Fraga I, Charters F J, O'Sullivan A D, *et al.* A novel modelling framework to prioritize estimation of non-point source pollution parameters for quantifying pollutant origin and discharge in urban catchments [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **167**: 75-84.
- [19] Sin G, Gernaey K V, Neumann M B, *et al.* Global sensitivity analysis in wastewater treatment plant model applications: prioritizing sources of uncertainty [J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 639-651.
- [20] 于云江, 向明灯, 孙朋. 健康风险评价中的不确定性 [J]. *环境与健康杂志*, 2011, **28**(9): 835-838.
- Yu Y J, Xiang M D, Sun P. Uncertainty in health risk assessment: a review of recent related studies [J]. *Journal of Environment Health*, 2011, **28**(9): 835-838.
- [21] Song X M, Zhang J Y, Zhan C S, *et al.* Global sensitivity analysis in hydrological modeling: review of concepts, methods, theoretical framework, and applications [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **523**: 739-757.
- [22] Anderson B, Borgonovo E, Galeotti M, *et al.* Uncertainty in climate change modeling: can global sensitivity analysis be of help? [J]. *Risk Analysis*, 2014, **34**(2): 271-293.
- [23] Mousivand A, Menenti M, Gorte B, *et al.* Global sensitivity analysis of the spectral radiance of a soil-vegetation system [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **145**: 131-144.
- [24] Wainwright H M, Finsterle S, Zhou Q L, *et al.* Modeling the performance of large-scale CO₂ storage systems: a comparison of different sensitivity analysis methods [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, **17**: 189-205.
- [25] Cho E, Arhonditsis G B, Khim J, *et al.* Modeling metal-sediment interaction processes: parameter sensitivity assessment and uncertainty analysis [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, **80**: 159-174.
- [26] Helton J C, Davis F J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2003, **81**(1): 23-69.
- [27] Olaya-Abril A, Parras-Alcántara L, Lozano-García B, *et al.* Soil organic carbon distribution in mediterranean areas under a climate change scenario via multiple linear regression analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **592**: 134-143.
- [28] 程晓光, 张静, 宫辉力. 半干旱半湿润地区 HSPF 模型水文模拟及参数不确定性研究 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(12): 3179-3187.
- Cheng X G, Zhang J, Gong H L. HSPF hydrologic simulation and parameter uncertainty in a semi-arid and semi-humid area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3179-3187.
- [29] Montgomery D C, Peck E A, Vining G G. *Introduction to linear regression analysis* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [30] Cohen J, Cohen P, West S G, *et al.* *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences* [M]. Mahwah, NJ: Routledge, 2013.
- [31] Christopher Frey H, Patil S R. Identification and review of sensitivity analysis methods [J]. *Risk Analysis*, 2002, **22**(3): 553-578.
- [32] Gamerith V, Neumann M B, Muschalla D. Applying global sensitivity analysis to the modelling of flow and water quality in sewers [J]. *Water Research*, 2013, **47**(13): 4600-4611.
- [33] Yi X, Zou R, Guo H C. Global sensitivity analysis of a three-dimensional nutrients-algae dynamic model for a large shallow lake [J]. *Ecological Modelling*, 2016, **327**: 74-84.
- [34] Neumann M B. Comparison of sensitivity analysis methods for pollutant degradation modelling: a case study from drinking water treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **433**: 530-537.
- [35] Bilotta G, Cappello A, Hérault A, *et al.* Sensitivity analysis of the MAGFLOW cellular automaton model for lava flow simulation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, **35**: 122-131.
- [36] Wan H, Xia J, Zhang L P, *et al.* Sensitivity and interaction analysis based on Sobol' method and its application in a distributed flood forecasting model [J]. *Water*, 2015, **7**(6): 2924-2951.
- [37] Wang J, Li X, Lu L, *et al.* Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended fourier amplitude sensitivity test method [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, **48**: 171-182.
- [38] Cukier R I, Levine H B, Shuler K E. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems [J]. *Journal of Computational Physics*, 1978, **26**(1): 1-42.
- [39] Guse B, Reusser D E, Fohrer N. How to improve the representation of hydrological processes in SWAT for a lowland catchment-temporal analysis of parameter sensitivity and model performance [J]. *Hydrological Processes*, 2014, **28**(4): 2651-2670.
- [40] Bui D T, Tuan T A, Hoang N D, *et al.* Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization [J]. *Landslides*, 2017, **14**(2): 447-458.
- [41] Saltelli A, Bolado R. An alternative way to compute fourier amplitude sensitivity test (FAST) [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 1998, **26**(4): 445-460.
- [42] Luan W F, Lu L, Li X, *et al.* Weight determination of sustainable development indicators using a global sensitivity analysis method [J]. *Sustainability*, 2017, **9**(2): 303.
- [43] Young P C. General theory of modelling for badly defined dynamic systems [A]. In: Vansteenkiste G C (Ed.). *Modeling, Identification and Control in Environmental Systems GC Vansteenkiste* [M]. Amsterdam: North-Holland, 1978.
- [44] Norton J. An introduction to sensitivity assessment of simulation

- models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, **69**: 166-174.
- [45] Pianosi F, Wagener T. A simple and efficient method for global sensitivity analysis based on cumulative distribution functions [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, **67**: 1-11.
- [46] 邓义祥, 王琦, 赖斯芸, 等. 优化、RSA 和 GLUE 方法在非线性和环境模型参数识别中的比较 [J]. *环境科学*, 2003, **24** (6): 9-15.
- [47] 杨彦, 于云江, 李定龙, 等. 电子废弃物拆解场多氯联苯含量及健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(4): 727-735. Yang Y, Yu Y J, Li D L, *et al.* Concentration and health risk assessment of PCBs in E-waste dismantling field [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(4): 727-735.
- [48] Ligaray M, Baek S S, Kwon H O, *et al.* Watershed-scale modeling on the fate and transport of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **320**: 442-457.
- [49] Li G, Wu S M, Wang L, *et al.* Concentration, dietary exposure and health risk estimation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Youtiao, a Chinese traditional fried food[J]. *Food Control*, 2016, **59**: 328-336.
- [50] Wu B, Zhang Y, Zhang X X, *et al.* Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the source water and drinking water of China: quantitative analysis based on published monitoring data[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **410-411**: 112-118.
- [51] Peng C, Wang M E, Chen W P. Modelling cadmium contamination in paddy soils under long-term remediation measures; model development and stochastic simulations [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 146-155.
- [52] 刘凯辉, 徐建全. 纯电动汽车驱动电机全生命周期评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(9): 3456-3463. Liu K H, Xu J Q. Life cycle assessment of driving motor on electric vehicle[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36** (9): 3456-3463.
- [53] 杨东, 刘晶茹, 杨建新, 等. 基于生命周期评价的风力发电机碳足迹分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(3): 927-934. Yang D, Liu J R, Yang J X, *et al.* Carbon footprint of wind turbine by life cycle assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(3): 927-934.
- [54] 孙铎, 刘晶茹, 杨东, 等. 家用空调碳足迹及其关键影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(4): 1054-1060. Sun X, Liu J R, Yang D, *et al.* The carbon footprint of household air-conditioner and its key influence factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(4): 1054-1060.
- [55] Bouraoui F. Testing the PEARL model in the Netherlands and Sweden [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, **22** (7): 937-950.
- [56] Licciardello F, Toscano A, Cirelli G L, *et al.* Evaluation of sediment deposition in a mediterranean reservoir: comparison of long term bathymetric measurements and SWAT estimations[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, **28**(2): 566-578.
- [57] Ahmadi M, Ascough II J C, Dejonge K C, *et al.* Multisite-multivariable sensitivity analysis of distributed watershed models: enhancing the perceptions from computationally frugal methods [J]. *Ecological Modelling*, 2014, **279**: 54-67.
- [58] Sarrazin F, Pianosi F, Wagener T. Global sensitivity analysis of environmental models: convergence and validation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, **79**: 135-152.
- [59] Zhang C, Chu J G, Fu G T. Sobol's sensitivity analysis for a distributed hydrological model of Yichun river basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **480**: 58-68.
- [60] Sun X Y, Newham L T, Croke B F W, *et al.* Three complementary methods for sensitivity analysis of a water quality model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, **37**: 19-29.
- [61] 黄金良, 林杰, 杜鹏飞. 城市降雨径流模拟的参数不确定性分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2224-2234. Huang J L, Lin J, Du P F. Parameter uncertainty analysis for urban rainfall runoff modelling [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2224-2234.
- [62] 李一平, 邱利, 唐春燕, 等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 410-416.
- [63] Li Y P, Qiu L, Tang C Y, *et al.* Uncertainty and sensitivity analysis of input conditions in large shallow lake hydrodynamic model[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 410-416.
- [64] 邹宗森, 施汉昌, 陈向强, 等. 生物滤池工艺的数值模拟与运行优化[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4627-4635. Zou Z S, Shi H C, Chen X Q, *et al.* Numerical simulation and operation optimization of biological filter [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4627-4635.
- [65] 席庆, 李兆富, 罗川. 基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1773-1780.
- [66] Xi Q, Li Z F, Luo C. Sensitivity analysis of AnnAGNPS model's hydrology and water quality parameters based on the perturbation analysis method [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1773-1780.
- [67] Yang W, Lang Y G, Li G L. Cancer risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soils from Jiaozhou Bay wetland [J]. *Chemosphere*, 2014, **112**: 289-295.
- [68] 李如忠, 钱靖, 董玉红, 等. 城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 481-489. Li R Z, Qian J, Dong Y H, *et al.* Influence of transient storage on solute transport and the parameter sensitivity analysis in a suburban drainage ditch [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (2): 481-489.
- [69] 张质明, 王晓燕, 李明涛, 等. 基于全局敏感性分析方法的 WASP 模型不确定性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1336-1346. Zhang Z M, Wang X Y, Li M T, *et al.* Uncertainty analysis of WASP based on global sensitivity analysis method [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1336-1346.
- [70] King D M, Perera B J C. Morris method of sensitivity analysis applied to assess the importance of input variables on urban water supply yield-a case study[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **477**: 17-32.
- [71] Dejonge K C, Ascough J C, Ahmadi M, *et al.* Global sensitivity and uncertainty analysis of a dynamic agroecosystem model under different irrigation treatments [J]. *Ecological Modelling*, 2012, **231**: 113-125.
- [72] Ahmed K, Chung E S, Song J Y, *et al.* Effective design and planning specification of low impact development practices using water management analysis module (WMAM): case of Malaysia [J]. *Water*, 2017, **9**(3): 173.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO ₃ ⁻ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)