

盛虎, 向男, 郭怀成, 等. 2013. 流域水质管理优化决策模型研究[J]. 环境科学学报, 33(1): 1-8

Sheng H, Xiang N, Guo H C, et al. 2013. Watershed optimal decision models for water-quality management[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(1): 1-8

流域水质管理优化决策模型研究

盛虎, 向男, 郭怀成*, 刘永

北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871

收稿日期: 2011-08-08 修回日期: 2012-06-16 录用日期: 2012-06-27

摘要: 针对目前流域水污染难以有效控制的局面, 依据已有的流域水文、水动力、水质、水生态相关机理模拟模型的研究, 在考虑了流域社会经济发展条件的基础上, 构建了流域水质管理优化决策模型框架体系. 基于该框架体系, 本文从简单流域系统优化模型、模拟与优化联合模型和时空尺度复杂优化模型 3 个方面对流域优化决策模型的研究发展历程进行综述, 并指出其各自在发展过程中所出现的问题. 最后, 提出了优化决策模型面临的瓶颈问题, 并从模型结构简化和适应性管理两个方面提出了相关的解决思路.

关键词: 流域水质管理; 模拟模型; 优化模型; 机器学习; 适应性管理

文章编号: 0253-2468(2013)01-01-08 中图分类号: X82 文献标识码: A

Watershed optimal decision models for water-quality management

SHENG Hu, XIANG Nan, GUO Huaicheng*, LIU Yong

College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871

Received 8 August 2011; received in revised form 16 June 2012; accepted 27 June 2012

Abstract: In light of the difficulties in effective water pollution control, this study formulated a watershed optimal management decision model framework based on relevant researches on mechanistic modeling of watershed hydrology, hydrodynamics, water quality and aquatic ecology. The decision model framework also took into account the existing socio-economic development status in watersheds. Based on this framework, we reviewed the history and current status of watershed optimal decision support models from three different aspects: simple systematic optimization models, coupled simulation-optimization model, and complicated optimization models on different temporal and spatial scales. Meanwhile, the problems during the development of watershed optimization models were identified. Finally, in order to solve the bottle-neck of computation for watershed optimization models, simplification of the structure of simulation models and adaptive management were recommended.

Keywords: watershed water-quality management; simulation model; optimization model; machine learning; adaptive management

1 引言 (Introduction)

水是生物赖以生存的基本条件, 随着人口的增长和城市化进程的加速, 人类不合理的生产生活方式导致水体污染和水生态破坏. 据《2010 年中国环境状况公报》报道: “204 条河流 409 个地表水国控监测断面中, I ~ III 类、IV ~ V 类和劣 V 类水质的断面比例分别为 59.9%、23.7% 和 16.4%. ……26 个国控重点湖泊 (水库) 中, 满足 II 类水质的 1 个, 占 3.8%; III 类的 5 个, 占 19.2%; IV 类的 4 个, 占 15.4%; V 类的 6 个, 占 23.1%; 劣 V 类的 10 个, 占 38.5%.” (<http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/>

2010zkgb/201106/t20110602_211577.htm). 可见, 中国的水环境现状仍然十分严峻, 河流耗氧有机型污染和湖泊氮磷营养型污染的问题仍然十分显著. 这些水环境问题的产生大大降低了水资源的可用性和可接触性, 限制了中国工农业的发展, 造成了水质型缺水和水产品食品安全等问题. 面对这些问题, 流域规划在系统诊断、综合评估、模拟预测和优化决策的基础上, 提供了改善水质和恢复水生态的战略部署和决策方案. 流域规划要求在流域尺度上, 以流域水环境子系统为核心, 以保障水质达标和水生态系统健康为目标, 以合理配置流域的水土资源从而优化流域社会经济发展为导向, 对未来某

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2008ZX07102-001)

Supported by the National Major Science and Technology Program “Water Body Pollution Control and Remediation” (No. 2008ZX07102-001)

作者简介: 盛虎 (1986—), 男, 博士, E-mail: shenghu@pku.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: hcguo@pku.edu.cn

Biography: SHENG Hu (1986—), male, Ph. D., E-mail: shenghu@pku.edu.cn; * **Corresponding author**, E-mail: hcguo@pku.edu.cn

一时期内流域全面发展所作出的统筹安排和设计. 如何科学地制定流域水环境和水生态保护措施, 在达到水环境保护目标的基础上, 寻求最小(或较小)的经济损失和(或)最大(或较大)的经济、生态和环境效益, 是流域规划需要回答的一个重要问题. 而流域优化决策模型则是回答这一问题的有效手段, 为量化制定最优的流域管理和保护措施提供了科学依据和技术支持. 为此, 本文从流域水质管理优化决策模型体系出发, 分析了流域水质管理优化决策模型的主要组分和相互联系, 论述了优化模型在流域水质管理优化决策过程中的应用和发展历程, 指明了流域水质管理优化决策模型发展所面临的瓶颈问题和相应的解决思路.

2 流域水质管理优化决策模型体系 (Modeling system for watershed optimal decision of water-quality management)

流域水质管理优化决策是建立在对流域的系统认知上的, 所以流域系统分析是流域水质管理优化决策的基础和依据. 量化的流域系统分析主要可以分为经验模型和机理模型两个部分, 经验模型仅仅考虑系统内部各个要素的统计关系而忽略由输入到输出所经历的过程, 机理模型则考虑了系统内部由输入到输出所经历的物理过程. 总体而言, 二者都可以表达成以下形式(王书功, 2010):

$$y = f(x, \theta) + \varepsilon \quad (1)$$

式中, x 表示系统输入, θ 表示系统参数, f 表示模型结构, y 表示系统输出, ε 表示系统的模拟误差, 对于一个无偏的系统, ε 的期望值为 0, 一般假定 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$, σ^2 为模拟误差的方差, 表征了系统的不确定性程度.

对于流域系统分析而言, 需要解决 3 个方面的问题: 第一, 如何评估社会经济发展模式, 即主要指流域内人口与经济的增长方式对流域点源与面源污染的贡献? 第二, 如何模拟这些污染源产生的有机污染、营养盐和重金属等污染物在陆域水文过程中的迁移和转化形式与进入水体前的水质和水量? 第三, 如何预测这些污染物进入水体以后在水动力的作用下发生物理、化学、生物作用后在水体中的时空分布状况及其对生态系统的影响? 对于第一个问题, 由于涉及到社会经济这个子系统, 很难准确的量化人口与经济增长同流域污染物产生之间的关系, 通常是采用统计分析和系统动力学模拟等方法来评估其影响. 而对于第二、三个问题, 主要考

虑的是污染物在流域内迁移转化及时空分布的自然过程, 很多常见的流域模型(如解决第二个问题的水文水质模型和解决第三个问题的水质水动力和水质水生态模型)都可以用于流域系统的定量分析. 总体而言, 流域模型用以回答流域规划过程中的“*What If*”问题, 即在污染源、气象条件、水文水量、地质地貌、土壤状况、土地利用方式、农业种植方式与施肥量、大气干湿沉降、底泥释放及水生态相关数据等数据的基础上, 通过模拟流域降雨、蒸发、下渗、产流、汇流等水文过程, 动态跟踪流域污染物在陆地上和水体中的迁移转化过程, 仿真流域水生生态系统的演化过程, 从而识别引起这些过程发生的重要因素及这些因素与过程之间的关系, 以便于提出协调生态环境保护和社会经济发展的备选决策方案, 并预测这些方案实施后对水质水生态的影响.

有了流域系统分析这个基础, 在明确了污染负荷输入和水体水质响应关系之后, 如果现状水质不能满足水体水生态功能的要求, 那么就需要制定流域污染控制方案对点源、面源和内源污染加以控制, 以消除或者减轻流域水体污染程度, 最终达到水质改善和水生态保护的目的. 流域水质管理优化决策模型便是辅助生成流域污染控制方案的一个重要手段, 用于解决流域管理中的“*What the Best*”问题, 即在流域系统调查与模拟分析的基础上, 以水体水质达标为约束, 以社会、经济、环境效益最大化为目标, 构建并求解流域水质管理优化决策模型, 生成在满足流域经济发展与资源环境约束最优污染控制方案, 评估方案的可行性与实施的经济效益、社会效益和环境效益, 为流域进行适应性管理提供技术支撑与方法平台. 流域水质管理优化决策模型的一般表达式如下:

$$\begin{aligned} \min & L(x, \theta) \\ & \{f(x, \theta) \leq y_{\max} \\ & f(x, \theta) \geq y_{\min} \\ \text{s. t. : } & \{g(x, \theta) = g_0 \\ & h(x, \theta) \geq h_0 \\ & \{x \geq 0, \theta \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, x , θ 和 f 表示的含义同前, 不过 x 可以细分为自然输入和人为输入两个部分, 这里把人为输入作为优化模型的决策变量, 另外, θ 为表征流域特征的参数, 其中有些参数是通过工程措施可以进行调整的, 这部分参数也可以作为优化模型的决策变量. L

为目标函数,表征治污成本或者生态损失的最小化(也可以以最大化流域社会、经济、环境效益为目标). y_{max} 和 y_{min} 分别为模型输出的上下限,比如污染物浓度低于某类水水质标准等. g 、 g_0 、 h 、 h_0 表征的是为实现某一目标所必须要满足的等式和不等式约束. 通过求解这个优化模型即可以得到在一定约束下(如人口与经济发展规模、经济投入、水质标准等)流域系统满足某一(些)目标(治污成本或者生态损失的最小化)下的最优方案和措施,作为流域规划的决策依据.

本文构建的流域水质管理优化决策模型体系按照流域水环境规划的整体思路主要由流域模拟模型与优化模型 2 个部分构成(如图 1 所示). 值得一提的有两个地方:一是数据模型,对于简单的模

拟模型,可以直接放入优化模型中采用非线性最优化方法或者进化算法进行求解;而对于复杂模型,随着计算复杂度的提高容易导致 NP 难问题的产生,一般采用替代模型的方法,其基本思路都是采用模拟模型生成输入与输出样本,然后再构造简化了的数据模型放入优化模型中进行求解. 在这个过程中,数据模型起到了沟通模拟模型和优化模型的桥梁作用. 另一是适应性管理(adaptive management),它是一种通过对流域管理方案进行适应性调整,采用实践来检验管理实施的效果,从而不断地降低决策过程中所产生的不确定性和风险的管理手段. 这两个方面的内容在后文中将会得到进一步的阐述.

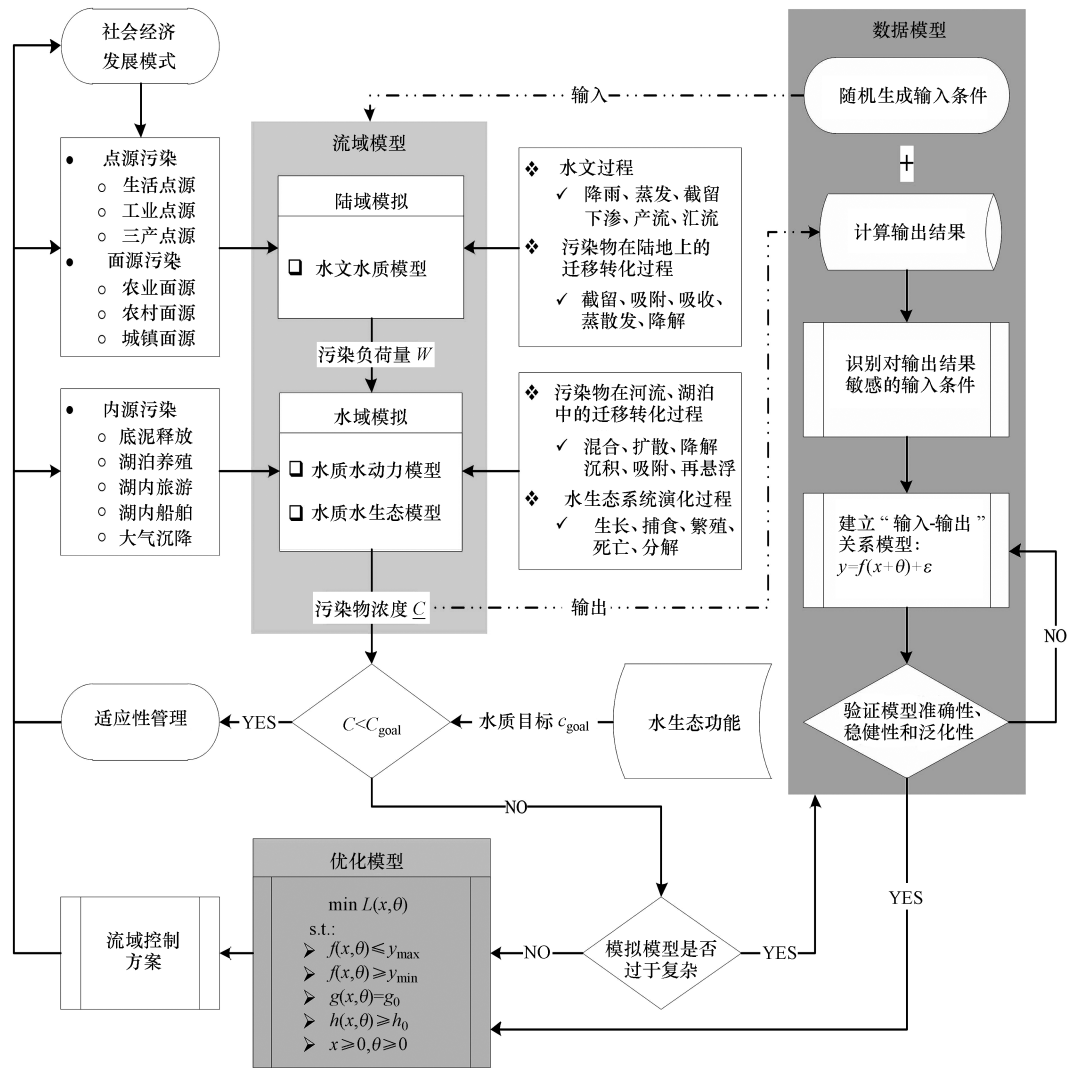


图 1 流域水质管理优化决策模型体系

Fig. 1 Modeling system for watershed optimal decision of water-quality management

3 流域水质管理优化决策模型研究进展 (Research progress on watershed optimal decision of water-quality management)

流域水质管理优化决策模型采用最优化建模的方法,确定流域内决策变量、目标函数和约束条件以及相关参数值,通过局部或者全局、确定性或者随机、线性或者非线性、整数或者实数优化算法求解满足约束条件并且达到目标(目标函数最大或最小)的决策变量的结果,用于指导流域水质管理决策过程.流域水质管理优化决策模型的发展历程贯穿于流域污染控制的发展阶段和优化模型建模及求解能力的发展过程之中.由于以流域为水污染防治、水生态恢复和社会经济可持续发展的基本单元这一理念的形成时间很短,将优化建模求解方法应用于流域综合管理的历史也并不长远,因而流域水质管理优化决策模型研究从时间上看并没有十分明晰的界线,许多经典的优化算法如求解线性规划的单纯形法、对偶单纯形法和求解非线性规划的梯度算法、牛顿法、拟牛顿法等,以及较先进的启发式搜索算法进化算法(遗传算法)、禁忌算法、模拟退火法、蚁群算法、粒子群优化算法等随机搜索算法等都曾被应用于流域综合管理的实际问题求解中.而对于多目标优化问题,传统的解法包括主要目标法、线性加权和法、平方和加权法、理想点法、乘除法和几何平均法等将多目标问题转化成单目标问题求解,目前则更多地用非支配排序的遗传算法(NSGA-II)来求解得到多目标问题的 Pareto 最优前沿面,为决策者做出有偏好的决策提供了更加直观的思路.此外,由环境问题的复杂性导致的环境系统输入输出响应的不确定性,也对不确定性规划方法的研究和发展起着促进作用.常规的不确定性优化模型主要有3类:随机规划、模糊规划和区间数规划,其解法通常是依据随机数学理论、模糊数学理论以及区间数学理论将不确定优化问题转化成确定性优化问题进行求解.为了研究的方便,本文不以优化模型的类型和求解方法作为分类准则,仅仅从优化模型在流域水环境规划的应用层面对已有的流域水质管理优化决策模型相关文献进行筛选和分析,并从逻辑的角度将其发展历程划分为以下3个部分.

3.1 简单流域系统优化模型

流域是一个水文气象、地质地貌、社会经济、资源环境相互作用的一个系统.以这个系统为研究对

象,在特定的水文气象和地质地貌条件下,如何实现流域社会经济发展的最大化同时又不导致资源的耗竭和环境的退化,是流域水质管理优化决策模型需要回答的一个重要问题.针对这一问题,早期的研究主要将流域这个大系统划分成各个子系统,包括社会子系统、经济子系统、资源子系统和环境子系统,分析各个子系统间和子系统内部各个要素间的相互关系,并在此基础上以资源的可利用性和环境的可恢复性(输入环境的污染负荷不超过环境容量或者最大允许排放量)为约束条件,以流域的社会(主要指人口)和经济(包括农业、工业和第三产业)发展的最大化为目标函数构建优化模型进行求解(黄国和, 1986;刘玉生等, 1992;曹瑞钰和顾国维, 1997).简单的流域系统优化模型在水质规划、饮用水水源地规划、水利设施优化调度、水污染控制与治理、监测布点、环境经济系统优化、经济结构调整、生态环境承载力计算等许多实际问题中得到了广泛的应用.建模时主要采用的模型方法是一般的线性规划、非线性规划、目标规划、动态规划等方法,当然,在具体的问题上,考虑的因素不同,那么求解过程的难易程度及结果的表现形式也不一样.

由于流域管理中社会经济的发展情况和人们对自然资源及环境的认知水平具有较大不确定性,为了考虑并度量流域管理优化决策过程中的不确定性,简单流域系统优化模型中还常常引入了基于随机、模糊和区间数的单/多目标不确定性规划方法,以增加对实际问题的适应性和模型求解的灵活性(郭怀成等, 1998;1999a;1999b;邹锐等, 1999;周丰等, 2008; Wang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2007).

3.2 模拟与优化联合模型

对于简单流域系统优化模型,其“简单”并非指其流域系统分析的过程或者建立的优化模型简单(如较少的决策变量、较少的约束条件和较为单一的目标函数),而是指优化模型并没有考虑系统的动态变化,或者没有考虑系统不同阶段之间的相互关系而使得不同的阶段相对独立.为了反映流域系统动态变化过程,流域水质模拟模型便引入到流域水质管理优化决策模型框架之中.

最初采用的是一种流程式的结合方式:为了衡量流域系统优化的结果是否能够有效地控制污染负荷或者改善水质,从而对水生态系统产生积极的

影响,需要将其作为模拟模型的最优输入条件进行动态模拟以评估其效果(Ward *et al.*, 2003),这种方式简称作“先优化后模拟”。在很多流域系统优化的过程中,模型的参数是很难从现有的统计和规划数据中获取的,只有借助于模拟模型的系统动态模拟过程,模拟模型为优化模型参数的获得提供便利条件(张雪花和郭怀成, 2002),这种方式简称为“先模拟后优化”。

上述模拟优化问题中,优化模型并没有真实的反映流域系统的非线性特征,也没有反映其动态变化特性,因而其所得到的最优解与真实的最优解存在一定的差异性。为解决这一问题,研究者将这类问题定性为“模拟-优化”问题,并提出了“模拟-优化”耦合模型,将模拟模型看作为一个含有时间、空间以及相关输入的函数直接嵌入到优化模型中,作为一个约束条件或者作为目标函数的一部分直接求解这个模型(Kuo *et al.*, 2006; Reichold *et al.*, 2010)。对于简单的甚至可以显示表达的模拟模型,可以采用“直接耦合”的方式通过经典的启发式搜索算法(如遗传算法)求出其近似解。但是对于复杂的高度非线性的模拟模型,直接耦合的方法在求解的过程中容易陷入“维数灾难”因而具有较高的时间复杂度和空间复杂度,不易求出最优解并且解的最优性也容易受到质疑。

虽然在过去 20 多年间国际上对直接耦合方法进行了大量深入研究,但始终无法克服其致命弱点,即这类方法在应用于中到大型模拟优化问题时常常无法在可行的计算条件下完成模型求解。面对直接耦合方法的缺陷,在世界范围内大量的研究人员探索了“间接耦合”的方法来克服计算瓶颈,即将模拟模型中对输出结果起着显著作用的输入条件进行固定或者随机抽样,通过模拟模型计算其对应的输出结果,然后采用数据建模(机器学习, Machine Learning, 包括统计建模、人工神经网络、支持向量机、决策树等方法)的方法建立其输入输出响应关系,从而得到始模拟模型的替代模型。由于替代模型一般具有很高的计算效率,因此将其代入优化模型中进行求解就可能较大地提高模拟优化问题的计算效率并获得原始模拟优化模型的近优解。然而,不可忽视的是这类间接耦合方法在避开计算瓶颈的同时,又带来了另一些问题,即其所获得的最优解的可靠性往往不能保证(邹锐等, 2010)。而且当原始模拟模型计算量比较大且决策变量过多时,

即使是产生替代模型本身就面临计算瓶颈的局限,所以间接耦合方法也不能为大型的流域模拟优化决策模型提供可靠高效的数学工具。近年来提出的“非线性-区间数映射算法”(nonlinearity interval mapping scheme, NIMS)在模拟优化问题的求解上比传统“间接耦合”方法的速度和准确性都有很大提高,该方法还在实际应用中不断地提高和完善(Zou *et al.*, 2010)。当然,要使流域模拟优化方法成为实现流域管理高效性与可靠性的技术基础,高效的求解复杂耦合模型体系的数学方法仍然需要更加深入地研究。

3.3 时空尺度复杂优化模型

流域水质管理的核心部分是流域水环境规划,而流域水环境规划则是在一定时间范围内,在不同的空间尺度上对流域内对人类的生产、生活活动以及水环境保护措施进行合理的安排。对人类的生产生活活动的安排,主要是约束人口的过度增长和经济的过度发展,从源头上控制污染负荷的产生;此外,也可以通过实施一定的环境保护措施,从污染物迁移转化的途径或末端进行控制和治理,从而达到水环境保护的要求。这些都要求流域系统优化模型能够动态的获得不同时空尺度下的最优环境保护策略。“模拟-优化”耦合模型的框架体系为实现这一过程提供了条件。然而,“模拟-优化”模型在解决与空间分布相关度较弱的流域点源污染控制方面较为成熟,而对于非点源污染的控制与治理还存在一定的局限性。目前,在非点源污染控制方面,流域水质管理优化决策模型主要有两类:其一是土地利用空间优化模型,另一是最佳管理措施(best management practices, BMPs)优化模型。以下对这两类模型的研究进展进行简要的阐述。

①土地利用空间优化模型:人类的农业生产、城市化、采矿、供水等活动对于流域土地利用变化/土地覆盖变化(land-use and land-cover change, LUCC)起着重要的影响,这种人类活动的影响引起了地表各种水文地理过程变化,而不合理的土地利用方式也导致了流域土壤侵蚀和非点源污染的加剧。土地利用空间优化模型就是一类通过约束人类不合理的生产活动,优化流域内各种用地类型大小及其空间分布,从而减少因暴雨径流而产生的非点源污染。起初,这类模型以 GIS 为分析工具,对流域的土地资源进行优化配置(Wang *et al.*, 2004),并用流域水文水质模型评估其对水质的改善及对生

产收益的增加 (Kaur *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005). 之后, 有研究将模拟模型以一个近似的数据拟合模型代替从而放入优化模型中进行最优土地利用的求解 (Yeo and Guldman, 2006), 并在此基础上进一步将流域空间细分成子流域和更小的单元, 从而逐级优化求解得到最优土地利用更加详细的空间分布 (Yeo *et al.*, 2007). 目前, 也有直接将模拟模型嵌套到优化模型中, 以土地利用方式为决策变量, 采用启发式搜索算法进行优化求解从而进行土地利用规划 (Qi *et al.*, 2008).

②最佳管理措施优化模型: 最佳管理措施 (BMPs) 是美国针对 1972 年修订通过的联邦水污染控制法 (federal water pollution control act, FWPCA) 中规定控制非点源污染的要求而发展起来的一种在非点源污染源进入水体前就将其减少和控制的工程与非工程方法、措施或操作程序. 其中, 工程性 BMPs 是指按照一定的暴雨标准和污染物去除标准设计和建造的各种工程设施; 非工程性 BMPs 是通过构建相关法律法规、政策、程序和方法实现非点源污染控制的管理措施. 由于 BMPs 是一个工程措施与管理措施的方案库, 对于某个具体的流域而言, 其水文、气象、地质、地形、地貌、土地利用方式和生产种植模式都有其自身的特色, 不同的 BMPs 的组合方式会产生不同的非点源污染控制效果以及不同的控制成本和农产品收益, 那么优化 BMPs 的组合方式则是实现流域非点源污染控制和相应的成本效益的重要手段. 目前的 BMPs 优化模型主要是以水质恶化程度的最小化和各个农场的收益最大化为目标函数, 采用遗传算法结合复杂的流域水文及非点源污染模拟模型 (如 AnnAGNPS、HSPF、SWAT 等) 对泥沙、营养盐等污染物进行动态模拟优化求解, 得到空间尺度下各个地块的最优 BMPs (Veith *et al.*, 2003; Gitau *et al.*, 2004; Veith *et al.*, 2004), 并且评估其对流域出口水质的影响 (Srivastava *et al.*, 2002; Srivastava *et al.*, 2003; Rabotyagov *et al.*, 2010). 此外, 还有针对多目标优化问题计算其 Pareto 最优边界以权衡 BMPs 的数量、成本效益、对水质的影响以及洪水控制的相关研究 (Perez-Pedini *et al.*, 2005; Maringanti *et al.*, 2009).

4 需要解决的瓶颈问题 (The bottleneck problem need to be solved)

从流域水质管理优化决策模型研究的发展历

程上看, 尽管较为简单的流域系统优化模型一直都在实际问题解决过程中发挥着重要的作用, 但从今后发展的趋势上看, 时空尺度复杂优化模型将更加精细地为流域规划提供时间上和空间上的优化方案. 那么, 流域水质管理优化决策模型就需要突破计算的时间复杂度和空间复杂度这一瓶颈问题. 可以说, 流域水质管理优化决策模型研究一直以来面临的关键难题并不在于优化模型本身的确立, 而在于其所优化对象——流域系统模拟的复杂性与不确定性, 以及针对这个问题所设计的优化算法. 由于流域模拟模型具有高度的复杂性和非线性, 流域水质管理优化决策模型一般不可能找到模拟模型的梯度而依据梯度信息进行确定性搜索, 更多的是采用启发式算法, 特别是遗传算法进行模型的求解. 那么, 在可以接受的时间内准确地将流域水质管理优化决策模型求解出来就成为一个必须解决的瓶颈问题. 尽管当前计算科学的研究热点如并行计算、分布式计算、网格计算都为大量计算的问题提供了一定的解决方案, 而且这些已经在流域规划中得到了一定的应用. 但是本文认为这些方法只能在一定程度上缓解计算压力而并没有解决根本性的问题. 因为就目前的水平而言, 在做流域水环境规划时, 往往会面临数据的尺度、系统性、完整性、准确性等各种实际问题. 如果单纯地采用过于复杂的模拟模型去拟合流域系统的输入输出响应关系, 有可能造成数据的“过拟合”或者参数的“异参同效”现象而导致更大的不确定性的产生, 从而给流域水质管理优化决策带来较大的风险. 这个时候, 优化决策的可靠性与准确性相比计算效率就更为重要了. 为此, 以下将从模型结构简化和适应性管理两个方面来对优化决策模型的计算效率与效果进行探讨.

4.1 模型结构简化

从优化计算的角度, 模型结构简化是指让模拟模型的结构尽可能的简单而又不缺失模拟的准确性, 其依据是奥卡姆剃刀原理, 即“最简单的假设是最好的”. 模型结构简化从优化模型的求解上看是对模型结构的一种优化. 因此, 在有限的数据库上, 有必要选择一种具有一定解释能力 (拟合性较高, 泛化能力较强) 简单模型, 从而在一定程度上降低决策的不确定性和风险. 机器学习为模型结构简化提供了一个可行的思路, 它以数据为基础, 通过监督学习、非监督学习、半监督学习和增强学习等

算法来实现数据规律自动获取,对未知数据进行预测从而指导优化决策.对于机理过程比较明确但又不太复杂的流域模拟问题,可以用比较完善的模拟模型进行对流域输入输出响应关系进行模拟,采用 Monte-Carlo 随机模拟或者拉丁超立方抽样(LHS)的方法生成“输入-输出”数据表,并用某种机器学习算法(如人工神经网络或者支持向量机等)实现这种输入输出响应关系的简单模型,同时验证其准确性、稳健性和泛化性,从而替代原始模型放入优化模型中求解.对于机理过程尚不明确的模拟问题,可以暂时不考虑机理过程而直接从数据出发构建输入输出响应模型,同样放入优化模型中直接求解.机器学习是目前数据科学研究的一个热门方向,主要应用于金融、医药、语言学、规划学等诸多领域,在环境领域的应用相对较少,对于求解复杂的“模拟-优化”问题在模型的准确性、稳健性和泛化性上还有很大的研究空间和广泛的应用前景.

4.2 适应性管理

在《弹性思维》一书中,以系统受到外界干扰后恢复其基本结构和功能的能力——“弹性”为核心概念,提出了过于强调资源的有效利用(优化配置)可能会削弱系统的弹性,从而不利于系统的可持续发展的观点(Walker *et al.*, 2006).从这个角度出发,在决策的过程中过于强调优化的作用也有可能物极必反的效果,而这种效果有时是不可恢复、不可逆转的.这种观点似乎对生态环境管理中优化决策的合理性进行了质疑.但从决策的角度看,任何决策都是具有一定的偏好性和不确定性的,往往需要权衡风险和收益,而这个过程也即优化决策的过程.本文认为适应性管理恰好能够平衡优化决策与系统弹性间的关系.适应性管理这一概念是 Holling(1978)提出来的,它是针对生态环境系统固有的不确定性,通过执行各种管理手段、政策和措施,监测实施这些政策措施后系统重要指标的实时状态,评估管理的效果并从中学习到相关知识,在此基础上修正或更新原来的管理措施,进行下一步管理的一种持续性的管理方法.这种管理方式是一种动态的管理过程,能够不断地从系统状态中学习到新的知识并加以更新,从而增进对系统的认识和理解,降低决策的不确定性和风险.对于流域水环境规划与管理,如果采用适应性管理手段,首先需要采用流域不确定性模拟模型对系统未来的状态进行预测和不确定性分析,然后根据预测评

估的结果利用流域不确定性优化决策模型制定当前所能实现的最优决策,形成最优管理措施付诸实践.此外,还需要对系统的状态指标进行实时监测以检验实际情况与之前的假设是否一致并从中获取新的信息和知识,进而不断地修正流域模拟模型与优化决策模型,指导下一阶段的管理实践,逐步降低系统的不确定性和风险以趋近于管理的最终目标.这里所说的“优化”,对于复杂的模拟模型,可以选出几种有效的情景方案进行分析,而不必苛求必须寻求系统的最优方案.按照这种思路适应性管理也能在一定意义上缓解流域水质管理优化决策模型大量计算的压力.环境系统不确定性的始终存在,适应性管理的过程实际上就是通过系统试错的方式寻求降低系统决策风险的“优化”过程,它在解决不确定性环境系统优化决策问题上将成为一个重要的研究手段和方法.

责任作者简介:郭怀成,教授、博士生导师,长期从事环境规划与管理、规划影响评价、环境系统工程、水污染控制的教学和科研工作,在国内外核心学术期刊上发表论文 200 余篇,其中 SCI 收录 80 余篇.

参考文献(References):

- 曹瑞钰,顾国维. 1997. 水环境治理工程费用优化模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 25(5): 548-552
- Gitau M W, Veith T L, Gburek W J. 2004. Farm-level optimization of bmp placement for cost-effective pollution reduction [J]. Transactions of the Asae, 47(6): 1923-1931
- 郭怀成,邹锐,徐云麟,等. 1998. 流域环境系统不确定性多目标规划方法及应用——不确定性模糊多目标规划模型[J]. 中国环境科学, 18(6): 510-513
- 郭怀成,徐云麟,邹锐,等. 1999a. 不完备信息条件下流域环境系统规划方法研究[J]. 环境科学学报, 19(4): 421-426
- 郭怀成,邹锐,徐云麟,等. 1999b. 流域环境系统不确定性多目标规划方法及应用研究——洱海流域环境系统规划[J]. 中国环境科学, 19(1): 33-37
- Holling C S. 1978. Adaptive Environmental Assessment and Management [M]. New York: Wiley
- 黄国和. 1986. 厦门市饮用水源流域农业环境污染控制系统的规划研究[J]. 环境科学学报, 6(3): 306-313
- Kaur R, Srivastava R, Betne R, *et al.* 2004. Integration of linear programming and a watershed-scale hydrologic model for proposing an optimized land-use plan and assessing its impact on soil conservation-a case study of the Nagwan watershed in the Hazaribagh district of Jharkhand, India [J]. International Journal of Geographical Information Science, 18(1): 73-98
- Kuo J T, Wang Y Y, Lung W S. 2006. A hybrid neural-genetic algorithm for reservoir water quality management [J]. Water

- Research, 40(7): 1367-1376
- Liu J C, Zhang, L P, Hong H S. 2005. An inexact system programming for agricultural land utilization based on nonpoint source pollution control in wuchuang watershed [J]. Environmental Informatics, Proceedings: 391-397
- Liu Y, Qin X S, Guo H C, *et al.* 2007. ICCLP: an inexact chance-constrained linear programming model for land-use management of lake areas in urban fringes [J]. Environmental Management, 40 (6): 966-980
- 刘玉生, 郑丙辉, 朱学庆. 1992. 滇池水污染控制系统规划[J]. 环境科学研究, 5(2): 1-7
- Maringanti C, Chaubey I, Popp J. 2009. Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control[J]. Water Resources Research, 45 (W06406), doi: 10. 1029/2008WR007094
- Perez-Pedini C, Limbrunner J F, Vogel R M. 2005. Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management-Asce, 131(6): 441-448
- Qi H H, Altinakar M S, Vieira D, *et al.* 2008. Application of tabu search algorithm with a coupled annagnps-ccheld model to optimize agricultural land use[J]. Journal of the American Water Resources Association, 44(4): 866-878
- Qi I Y, Guldmann J M. 2006. Land-use optimization for controlling peak flow discharge and nonpoint source water pollution[J]. Environment and Planning B-Planning & Design, 33(6): 903-921
- Rabotyagov S S, Jha M K, Campbell T. 2010. Impact of crop rotations on optimal selection of conservation practices for water quality protection[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 65 (6Sp. Iss. SI): 369-380
- Reichold L, Zechman E M, Brill E D. 2010. Simulation-optimization framework to support sustainable watershed development by mimicking the predevelopment flow regime [J]. Journal of Water Resources Planning and Management-Asce, 136(3): 366-375
- Srivastava P, Hamlett J M, Robillard P D. 2003. Watershed optimization of agricultural best management practices: continuous simulation versus design storms[J]. Journal of the American Water Resources Association, 39(5): 1043-1054
- Srivastava P, Hamlett J M, Robillard P D, *et al.* 2002. Watershed optimization of best management practices using annagnps and a genetic algorithm [J]. Water Resources Research, 38 (10213), doi:10. 1029/2001WR000365
- Veith T L, Wolfe M L, Heatwole C D. 2003. Optimization procedure for cost effective bmp placement at a watershed scale[J]. Journal of the American Water Resources Association, 39(6): 1331-1343
- Veith T L, Wolfe M L, Heatwole C D. 2004. Cost-effective bmp placement: optimization versus targeting [J]. Transactions of the Asae, 47(5): 1585-1594
- Walker B, Salt D. 2006. Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World (p. 192)[M]. Washington D C: Island Press. Retrieved from [http://www. amazon. com/dp/1597260932](http://www.amazon.com/dp/1597260932)
- 王书功. 2010. 水文模型参数估计方法及参数估计不确定性研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社
- Wang L J, Meng W, Guo H C, *et al.* 2006. An interval fuzzy multiobjective watershed management model for the lake Qionghai watershed, China [J]. Water Resources Management, 20 (5): 701-721
- Wang X H, Yu S, Huang G H. 2004. Land allocation based on integrated GIS-optimization modeling at a watershed level [J]. Landscape and Urban Planning, 66(2): 61-74
- Ward D P, Murray A T, Phinn S R. 2003. Integrating spatial optimization and cellular automata for evaluating urban change[J]. Annals of Regional Science, 37(1): 131-148
- Yeo I Y, Guldmann J M, Gordon S I. 2007. A hierarchical optimization approach to watershed land use planning [J]. Water Resources Research, 43 (W1141611), doi:10. 1029/2006WR005315
- 张雪花, 郭怀成. 2002. SD-MOP 整合模型在秦皇岛市生态环境规划中的应用研究[J]. 环境科学学报, 22(1): 92-97
- 周丰, 陈国贤, 郭怀成, 等. 2008. 改进区间线性规划及其在湖泊流域管理中的应用[J]. 环境科学学报, 28(8): 1688-1698
- 邹锐, 郭怀成, 刘磊. 1999. 洱海流域环境经济相协调的农林土地利用不确定性系统规划[J]. 环境科学学报, 19(2): 186-193
- Zou R, Liu Y, Riverson J, *et al.* 2010. A nonlinearity interval mapping scheme for efficient waste load allocation simulation-optimization analysis[J]. Water Resources Research, 46 (W08530), doi: 10. 1029/2009WR008753
- 邹锐, 张祯祯, 刘永, 等. 2010. 神经网络模型用于数值水质模型逼近的适用性及非敏感参数的欺骗效应[J]. 环境科学学报, 30 (10): 1964-1970