

基于 EPANET-MSX 的多组分给水管网水质模型的开发与应用

孙傅, 陈吉宁, 曾思育

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 基于 EPANET-MSX 工具包开发了机制性的多组分给水管网水质模型, 模型将管段概化为管壁、生物膜、液膜和液相 4 个组成部分. 模拟过程包括基质利用和微生物生长、微生物衰减和死亡、溶解性物质的液膜传质、不溶性物质的吸附和脱落、余氯与有机物的氧化和卤代反应以及管壁腐蚀消耗余氯等. 模拟变量共 15 个, 包括生物膜和液相中各 7 个变量, 即溶解性有机物、不溶性有机物、氨氮、余氯、异养菌、自养菌和惰性颗粒, 以及管壁生物膜厚度. 利用管段模拟实验数据进行模型验证, 模型对余氯和浊度的模拟精度分别为 0.1 mg/L 和 0.3 NTU. 案例研究的模拟结果合理地反映了给水管网中余氯和浊度的动态变化特征, 而同时考虑水厂出水水质可变性和参数不确定性的 Monte Carlo 模拟则可用于评价案例给水管网的水质超标风险.

关键词: EPANET; Monte Carlo 模拟; 给水管网; 多组分; 水质模型

中图分类号: X830.3; X832 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2008)12-3360-08

Development and Application of a Multi-Species Water Quality Model for Water Distribution Systems with EPANET-MSX

SUN Fu, CHEN Ji-ning, ZENG Si-yu

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A conceptual multi-species water quality model for water distribution systems was developed on the basis of the toolkit of the EPANET-MSX software. The model divided the pipe segment into four compartments including pipe wall, biofilm, boundary layer and bulk liquid. The involved processes were substrate utilization and microbial growth, decay and inactivation of microorganisms, mass transfer of soluble components through the boundary layer, adsorption and desorption of particular components between bulk liquid and biofilm, oxidation and halogenation of organic matter by residual chlorine, and chlorine consumption by pipe wall. The fifteen simulated variables included the seven common variables both in the biofilm and in the bulk liquid, i.e. soluble organic matter, particular organic matter, ammonia nitrogen, residual chlorine, heterotrophic bacteria, autotrophic bacteria and inert solids, as well as biofilm thickness on the pipe wall. The model was validated against the data from a series of pilot experiments, and the simulation accuracy for residual chlorine and turbidity were 0.1 mg/L and 0.3 NTU respectively. A case study showed that the model could reasonably reflect the dynamic variation of residual chlorine and turbidity in the studied water distribution system, while Monte Carlo simulation, taking into account both the variability of finished water from the waterworks and the uncertainties of model parameters, could be performed to assess the violation risk of water quality in the water distribution system.

Key words: EPANET; Monte Carlo simulation; water distribution system; multi-species; water quality model

数学模拟是研究给水管网内在动力学过程、开展给水管网规划和设计、评价和优化给水管网运行状况以及保障给水管网设施和水质安全的重要方法^[1]. 由于研究者对管网内在过程认识水平以及计算设备运算能力的局限, 早期的给水管网水质模型多为单组分模型^[2, 3], 即认为管网中某组分的反应速率仅与其自身浓度相关. 单组分水质模型结构简单, 即使应用于大尺度的管网系统也可快速求解, 并且大量研究表明, 这类模型经校准后能够较好地模拟消毒剂、示踪剂、浊度等在实际管网中的变化^[4~6]. 然而, 实际给水管网中众多水质组分之间的相互作用往往是不可忽略的^[7, 8], 并且饮用水中受关注有害物质日益增多的趋势客观上也要求研究者

开展多组分水质模拟.

EPANET 是美国环境保护署 (environmental protection agency, EPA) 开发的一套源代码公开的给水管网水力学和水质模拟软件, 其现行版本为 2000 年发布的 2.0 版^[9]. EPANET 2.0 的水质模拟模块是单组分模型, 为了增强其水质模拟功能, 美国 EPA 于 2007 年 8 月发布了支持多组分水质模拟的扩展版, 即 EPANET-MSX (Multi-Species eXtension)^[8]. 用户通过联合使用 EPANET-MSX 和 EPANET 2.0 的工具

收稿日期: 2007-12-05; 修订日期: 2008-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50238020)

作者简介: 孙傅 (1981~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为给水系统水质模拟与风险管理, E-mail: sunfu@tsinghua.org.cn

包可以自定义给水管网的反应动力学方程, 从而模拟管网中更多的水质组分和反应过程。

本研究基于 EPANET-MSX 工具包开发机制性的多组分给水管网水质模型, 利用管段模拟实验数据进行模型验证, 并在案例研究中应用该模型模拟给水管网的水质动态变化及其超标风险。

1 研究方法

1.1 模型开发

模型将给水管网的管段视为推流式反应器, 并且忽略轴向的扩散过程, 则对于如图 1 所示的任意 Δx 的微元可以建立如式 (1) 所示的物料平衡方程。

$$\frac{\partial [c_i]}{\partial t} = -U \frac{\partial [c_i]}{\partial x} + r(c_i) \tag{1}$$

式中, $[c_i]$ 为微元中模拟变量 c_i 的浓度 (mg/L), U 为管段流速 (m/min), $r(c_i)$ 为变量 c_i 在微元中的总体反应速率 [$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$], t 为时间 (min), i 为模拟变量的编号。

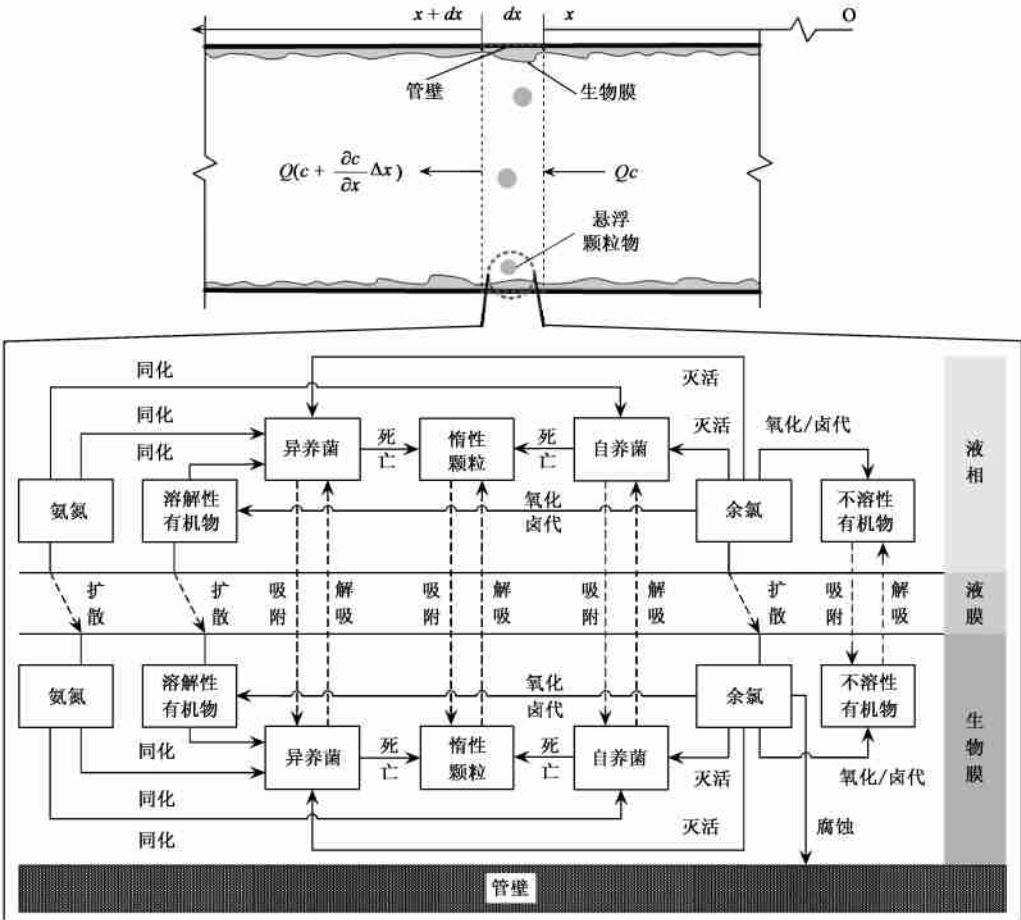


图 1 多组分给水管网水质模型概化

Fig. 1 Conceptualization of the multi-species water quality model for water distribution systems

每个微元包括管壁、生物膜、液膜和液相 4 个组成部分, 其中发生的物质传递和转化过程如图 1 所示。模型的模拟变量共 15 个, 包括生物膜和液相中各 7 个变量, 即溶解性有机物、不溶性有机物、氨氮、余氯、异养菌、自养菌和惰性颗粒, 以及管壁生物膜厚度。为简化结构, 模型做出以下基本假设^[19]:

(1) 微元内生物膜和液相均为完全混合式反应器, 二者通过液膜发生传质;

(2) 生物膜均匀分布在管壁且性质均一, 传质仅

发生在与管壁垂直的方向, 而不考虑与管壁平行方向的传质;

(3) 液相中溶解性物质通过分子扩散穿过液膜进入生物膜, 其扩散速率符合 Fick 定律, 且溶解性物质的分子扩散系数均相等;

(4) 液相中不溶性物质通过吸附过程进入生物膜, 其吸附速率符合一级反应, 且不溶性物质的吸附速率常数均相等;

(5) 生物膜中的不溶性物质脱落后进入液相, 其

脱落速率符合一级反应, 且不溶性物质的脱落速率常数均相等;

(6) 液相和生物膜中的异养菌或自养菌的代谢特性相同, 其生长速率均符合 Monod 方程, 内源呼吸引起的自然衰减速率符合一级反应, 而余氯灭活导致的死亡速率符合二级反应, 微生物衰减或被余氯灭活之后均转化为惰性颗粒;

(7) 管网中余氯继续与有机物发生氧化和卤代反应, 其反应速率符合二级反应;

(8) 液膜传质速率和生物膜中颗粒脱落速率均

$$\frac{d[\text{SCOD}_L]}{dt} = - \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{[\text{SCOD}_L]}{k_{HC} + [\text{SCOD}_L]} \frac{[\text{NH}_{3L}]}{k_{HN} + [\text{NH}_{3L}]} [\text{HBL}] - D_F A_V U([\text{SCOD}_L] - [\text{SCOD}_F]) - k_{chr} \frac{[\text{SCOD}_L][\text{Cl}_{2L}]}{71 \times 1000} \cdot e_{qCl} \quad (2)$$

$$\frac{d[\text{NCOD}_L]}{dt} = k_{da} A_V U \cdot L_F [\text{NCOD}_L] - k_{adp} A_V [\text{NCOD}_L] - k_{chr} \frac{[\text{NCOD}_L][\text{Cl}_{2L}]}{71 \times 1000} \cdot e_{cCl} \quad (3)$$

$$\frac{d[\text{NH}_{3L}]}{dt} = - \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{[\text{SCOD}_L]}{k_{HC} + [\text{SCOD}_L]} \frac{[\text{NH}_{3L}]}{k_{HN} + [\text{NH}_{3L}]} [\text{HBL}] \cdot e_{NC} - \frac{\mu_A}{Y_A} \frac{[\text{NH}_{3L}]}{k_{AN} + [\text{NH}_{3L}]} [\text{ABL}] - D_F A_V U([\text{NH}_{3L}] - [\text{NH}_{3F}]) \quad (4)$$

$$\frac{d[\text{HBL}]}{dt} = \mu_H \frac{[\text{SCOD}_L]}{k_{HC} + [\text{SCOD}_L]} \frac{[\text{NH}_{3L}]}{k_{HN} + [\text{NH}_{3L}]} [\text{HBL}] - k_{dH} [\text{HBL}] - k_{adp} A_V [\text{HBL}] - k_{int} [\text{HBL}][\text{Cl}_{2L}] + k_{da} A_V U \cdot L_F [\text{HBF}] \quad (5)$$

$$\frac{d[\text{ABL}]}{dt} = \mu_A \frac{[\text{NH}_{3L}]}{k_{AN} + [\text{NH}_{3L}]} [\text{ABL}] - k_{dA} [\text{ABL}] - k_{adp} A_V [\text{ABL}] - k_{int} [\text{ABL}][\text{Cl}_{2L}] + k_{da} A_V U \cdot L_F [\text{ABF}] \quad (6)$$

$$\frac{d[\text{ISL}]}{dt} = (k_{dH} [\text{HBL}] + k_{dA} [\text{ABL}]) \cdot e_{M/C} + k_{int} ([\text{HBL}] + [\text{ABL}]) [\text{Cl}_{2L}] \cdot e_{M/C} + k_{da} A_V U \cdot L_F [\text{ISF}] - k_{adp} A_V [\text{ISL}] \quad (7)$$

$$\frac{d[\text{Cl}_{2L}]}{dt} = - D_F A_V U([\text{Cl}_{2L}] - [\text{Cl}_{2F}]) - k_{int} ([\text{HBL}] + [\text{ABL}]) [\text{Cl}_{2L}] \cdot e_{C/C} - k_{chr} \frac{([\text{SCOD}_L] + [\text{NCOD}_L])[\text{Cl}_{2L}]}{32 \times 1000} \quad (8)$$

1.2 参数率定

考虑到实验数据的可获得性以及实际管网系统的高度复杂性, 本研究中用于模型验证的数据来自加拿大 Dalhousie 大学 Rutledge 在 Halifax 市开展的闭合环形管段模拟实验^[11]. 该模拟实验的管网进水为某地表水厂出水, 管网流速为 0.3 m/s, 同时实验还测试了多种管材和工况条件, 实验条件与实际管网系统较为接近. 本研究只选用水泥砂浆内衬的球墨铸铁管(管材 I) 以及沥青涂层和水泥砂浆内衬的球墨铸铁管(管材 II) 2 种管材的实验数据, 其中管材 I 有停留时间分别为 6 h 和 24 h 2 种工况的数据, 而管材 II 只有停留时间为 24 h 1 种工况的数据. 有

与管段流速成正比;

(9) 管段进出水中不溶性组分的质量浓度与浊度线性相关.

基于上述假设可以推导得到各模拟变量的反应速率 $r(c_i)$ 的表达式, 进而建立物料平衡方程. 限于篇幅, 这里仅给出液相中 7 个模拟变量的物料平衡方程, 即式(2)~(8), 式中变量和参数的含义如表 1 所示. 模型共有 20 个待率定参数, 其它参数及方程参见文献[10].

关该模拟实验的具体情况和结果参见文献[11]. 考虑到实验数据的完整性以及我国饮用水水质标准关注的管网水质指标, 本研究选择余氯和浊度作为目标函数率定参数并验证模型的模拟效果.

本研究采用 Homberger Spear Young (HSY) 算法^[12, 13] 率定参数, 算法的具体步骤参见文献[12~14], 其中可接受行为参数(behavior giving parameters) 定义为使得余氯和浊度模拟值与实测值绝对误差分别小于 0.1 mg/L 和 0.3 NTU 的参数. HSY 算法抛弃了传统参数识别的“寻优”思想, 承认模型参数的不确定性, 因而识别得到的模型参数不再是参数空间中的一个单点, 而是由可接受参数形成的具有一定

表 1 模型的变量和参数

Table 1 Variables and parameters of the model

变量	含义	单位	参数	含义	单位
[SCOD _L]	液相中溶解性有机物浓度	mg/L	μ_H	异养菌最大比增长速率	min^{-1}
[NCOD _L]	液相中不溶性有机物浓度	mg/L	Y_H	异养菌产率系数(COD/COD)	mg/mg
[NH _{3L}]	液相中氨氮浓度	mg/L	k_{HC}	异养菌生长的碳半饱和和常数(以 COD 计)	mg/L
[HB _L]	液相中异养菌浓度(以 COD 计)	mg/L	k_{HN}	异养菌生长的氮半饱和和常数(以 N 计)	mg/L
[AB _L]	液相中自养菌浓度(以 COD 计)	mg/L	$e_{N/C}$	异养菌的氮含量(N/COD)	mg/mg
[IS _L]	液相中惰性颗粒浓度	mg/L	μ_A	自养菌的最大比增长速率	min^{-1}
[Cl _{2L}]	液相中余氯浓度	mg/L	Y_A	自养菌的产率系数(COD/N)	mg/mg
[SCOD _F]	生物膜中溶解性有机物浓度(以 COD 计)	mg/L	k_{AN}	自养菌生长的氮半饱和和常数(以 N 计)	mg/L
[NCOD _F]	生物膜中不溶性有机物浓度(以 COD 计)	mg/m ²	k_{dH}	异养菌自然衰减的速率常数	min^{-1}
[NH _{3F}]	生物膜中氨氮浓度	mg/L	k_{dA}	自养菌自然衰减的速率常数	min^{-1}
[HB _F]	生物膜中异养菌浓度(以 COD 计)	mg/m ²	k_{int}	余氯灭活微生物的速率常数	$\text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$
[AB _F]	生物膜中自养菌浓度(以 COD 计)	mg/m ²	$e_{C/C}$	余氯灭活微生物的消耗系数	1/COD
[IS _F]	生物膜中惰性颗粒浓度	mg/m ²	D_F	液膜传质系数	1
[Cl _{2F}]	生物膜中余氯浓度	mg/L	$e_{M/C}$	微生物与惰性颗粒之间的转化系数	1/COD
L_F	生物膜厚度	m	k_{adp}	不溶性组分的吸附速率常数	m/min
A_V	管段比表面积	m^{-1}	k_{det}	不溶性组分的脱落速率常数	m^{-1}
U	管段流速	m/min	k_{chr}	有机物与余氯反应的速率常数	$\text{L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{min})^{-1}$
			e_{GCl}	有机物与余氯反应的化学计量系数	1

空间分布特征的参数集合,在一定程度上避免“最优”参数失真可能带来的决策风险^[14, 15],同时为模型应用于给水系统水质风险评价奠定了基础.但考虑到模型参数率定结果表达的需要以及下文模型应用于管网水质动态模拟的需要,本研究在参数率定中亦保存了一组使得余氯和浊度的相对误差之和最小的参数,即传统意义上的“最优”参数.

1.3 模型应用

本研究选择国内外给水管网模拟研究中广泛应用的美国康涅狄格州中南区水务局 Cherry Hill/Brushy Plains 服务区的给水管网作为研究案例^[2, 4, 16],并假设其供水水质与我国南方某水厂相同(数据参见文献[10]),而管材状况与上述模拟实验中的管材 II 相同,从而利用多组分给水管网水质模型模拟该管网中余氯和浊度的动态变化及其超标风险.该管网包括 40 个管段和 36 个节点,其空间布局如图 2 所示.

1.4 编程实现

基于 EPANET-MSX 软件运行多组分给水管网水质模型需准备 EPANET 标准版的输入文件(*.inp)及其扩展版的输入文件(*.msx),文件格式要求分别参见文献[8, 9].*.inp 文件保存给水管网水力学模拟所必需的信息,包括管网中各管段和节点的尺寸、需水量、高程、粗糙系数等,*.msx 文件则定义了模型模拟的水质组分及其反应动力学表达式.在 MATLAB 中编写程序调用 EPANET 和 EPANET-MSX

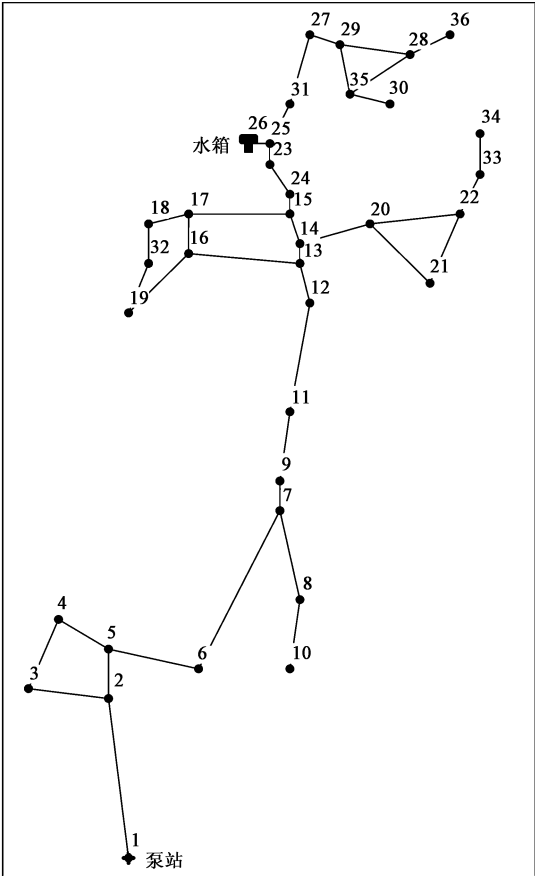


图 2 案例给水管网的结构示意

Fig. 2 Schematic of the studied water distribution system

的动态链接库(dynamic link library, DLL)文件,即 epanet2.dll 和 epanetmsx.dll,利用其中的函数实现输

入文件读入、数据读取和修改、管网水力学和水质模拟、输出文件保存等功能,从而完成参数率定和模型应用.

2 结果与讨论

2.1 多组分给水管网水质模型验证

图3给出了管材I在停留时间6 h和24 h 2种工况以及管材II在停留时间24 h 1种工况下符合可

接受行为定义且使得观测变量相对误差之和最小的模拟结果.从图3可以看出,管材I在停留时间6 h工况下出水余氯略有下降,而浊度没有显著上升;在停留时间24 h工况下,2种管材的出水余氯衰减量和浊度均显著增大.本研究开发的多组分管网水质模型较好地模拟了这些实验现象,在2种管材的3种工况下除部分监测点误差较大,余氯和浊度的模拟值与观测值总体上吻合较好.

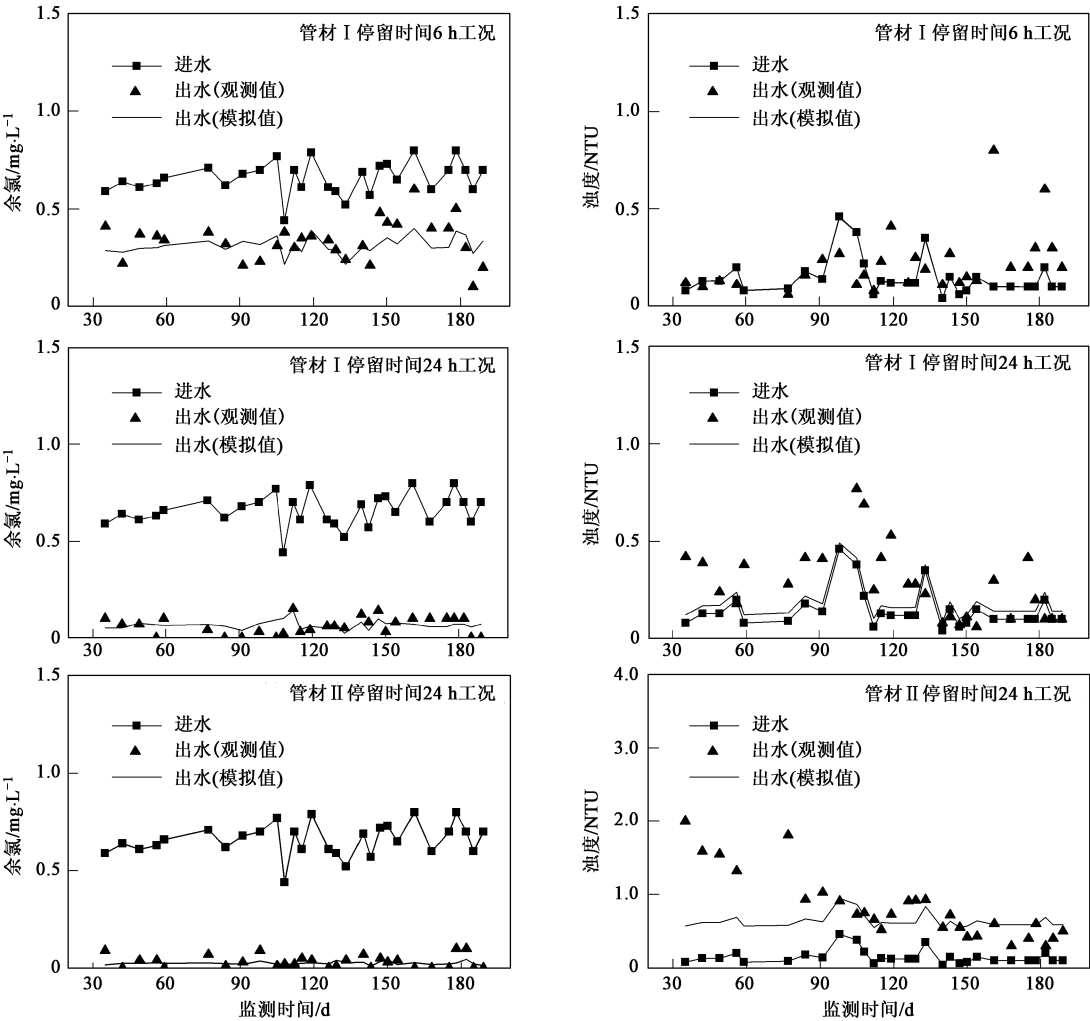


图 3 多组分给水管网水质模型的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of the multispecies water quality model for water distribution systems

为了更加全面地验证模型的有效性,本研究除了比较模型模拟值与实际观测值之间的吻合程度之外,还开展了预知性模型验证 (prognostic model validation),即检验模型概化是否与公认的科学原理以及预期的系统行为相一致^[17].对于本研究建立的基于模拟过程概化的机制模型而言,模拟过程实际上是由模型参数表征的,因此对模型概化的检验可

以转化为对模型参数的检验,这可以通过模型参数的不确定性分析完成^[10, 17].预知性模型验证的结果亦表明,本研究开发的多组分管网水质模型具有较高的可靠性.例如,模型参数的不确定性分析结果表明,参数 k_{in} 、 $e_{C/C}$ 和 $e_{M/C}$ 的可识别性较好,概率密度均出现明显的峰值,这说明管段内存在的微生物尤其是管壁表面的生物膜是导致余氯衰减的一个重要

原因,这与文献[4,5]中的结论是一致的.同时,本研究还通过比较识别得到的模型参数数值与实验室单一机制实验获得的参数数值以及文献中相似机制模型的参数数值的吻合程度,检验参数数值的合理性,从而保证模型参数可在一定范围内外推应用.例如,模型参数的不确定性分析结果表明,参数 e_{NC} 的概率密度在 0.08~0.10 之间出现峰值,这与文献[18~20]中数值吻合较好.

2.2 给水管网水质动态模拟

以我国南方某水厂出水水质的平均值作为管网的进水水质,并假设管网的管材状况与上述模拟实验中的管材 II 相同,模拟案例给水管网中余氯和浊度的动态变化,部分节点的模拟结果如图 4 所示.其中,节点 1 和 26 分别为泵站和水箱,节点 25 和 36 分别为管网中间点和末梢点.从图 4 可以看出,各个节点的水质在经历一段时间的变化之后趋于稳定或呈现周期性变化,这是由给水管网运行工况的周期

性决定的.节点 1 直接接受水厂出水,因此水泵运行期间其水质与水厂出水一致;水泵停机期间,由于管段内水体的水力停留时间增加,其余氯略有下降,但浊度基本保持稳定.节点 25、26 和 36 的余氯呈现先下降(或波动下降)后上升(或波动上升)的趋势,而浊度则呈现先上升(或波动上升)后下降(或波动下降)的趋势,管网其它节点的水质变化规律亦与之相似.节点 25 的浊度最大值为 0.35 NTU,这亦是模拟时段内整个管网出现的浊度最大值,与其临近水箱因而水力条件变化剧烈有关.节点 36 的余氯最小值为 0.09 mg/L,这亦是模拟时段内整个管网出现的余氯最小值,与其处于管网末梢且水量较小有关.与节点 25 和 36 相比,节点 26 的水质变化相对缓和,没有出现较大波动,这是因为水箱内的水位相对稳定,前 55 h 相对于平均水位的最大变化约为 20%,55 h 后的最大变化低于 15%.因此,模型的模拟结果合理地反映了案例给水管网中余氯和浊度的动态变化特征.

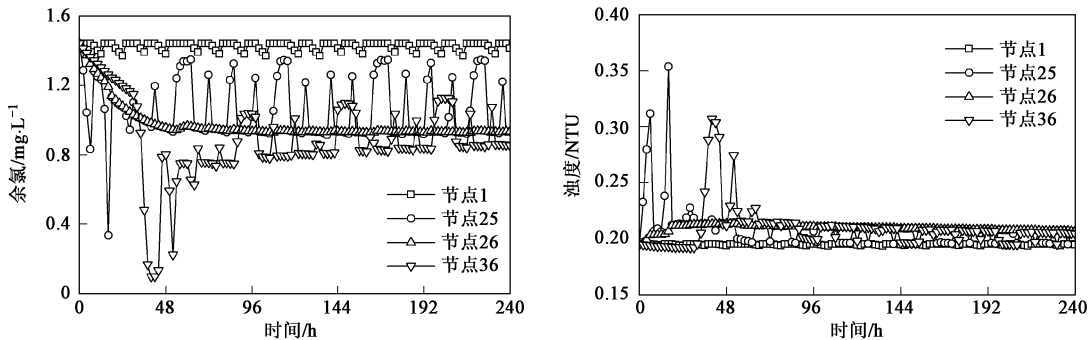


图 4 案例给水管网部分节点的水质动态变化

Fig. 4 Variation of water quality at several joints of the studied water distribution system

从图 4 还可以看出,在水厂出水平均值的模拟条件下,案例给水管网的余氯和浊度均能满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)的要求,即管网末梢水余氯高于 0.05 mg/L 以及浊度低于 1 NTU.模拟结果还表明,除水箱外其它节点的余氯最小值以及所有节点的浊度最大值均出现在前 55 h,即一个运行工况周期,而水箱在前 55 h 的最小值与其水质达到稳定时的最小值误差小于 0.02 mg/L.因此,下文利用 Monte Carlo 方法模拟给水管网水质风险时,每次模拟的时间长度均设为 55 h 以减少计算量.

2.3 给水管网水质风险模拟

余氯和浊度是评价给水管网水质微生物安全性以及判断管网是否受到其它污染的重要指示性指标^[21~23].本研究假定《生活饮用水卫生标准》规定的余氯和浊度的浓度限值能够保证饮用水安全,因而

把水质超标即管网末梢水余氯低于 0.05 mg/L 和浊度低于 1 NTU 的事件定义为风险.考虑水厂出水水质的可变性和模型参数的不确定性,利用 Monte Carlo 方法模拟案例给水管网的水质风险.在每次模拟中,管网进水水质根据水厂出水水质的概率分布随机取值,而模型参数从可接受参数集合中随机取值,运行模型后记录每个节点在 55 h 模拟时段内出现的余氯最小值和浊度最大值.进行足够次数的 Monte Carlo 模拟之后,汇总每个节点的水质模拟结果,获得其统计特征.

模拟结果表明,进行 1000 次模拟之后各节点的水质超标概率已趋于稳定,波动范围在 1% 以内.图 5 以箱式图表示了各节点余氯和浊度的概率分布,其中矩形上下两边分别对应第 75 和第 25 百分位数,矩形内的横线表示中位数,而纵向触须线分别延

伸至最大值和最小值. 当水厂出厂水的余氯和浊度符合《生活饮用水卫生标准》, 即余氯介于 0.3~4 mg/L 之间而浊度低于 1NTU 时, 除节点 1~7 和节点 9 之外的其它管网节点均存在不同程度的余氯不达标现象, 但所有管网节点的浊度均能达标. 在余氯存

在不达标现象的 28 个节点中, 节点 28、30、33、34 和 36 等 5 个处于管网末梢的节点的余氯达标率分别为 83.0%、92.5%、85.9%、74.8% 和 71.8%, 低于《生活饮用水卫生标准》中达标率不低于 95% 的要求, 而其它 23 个节点的余氯达标率均高于 95%.

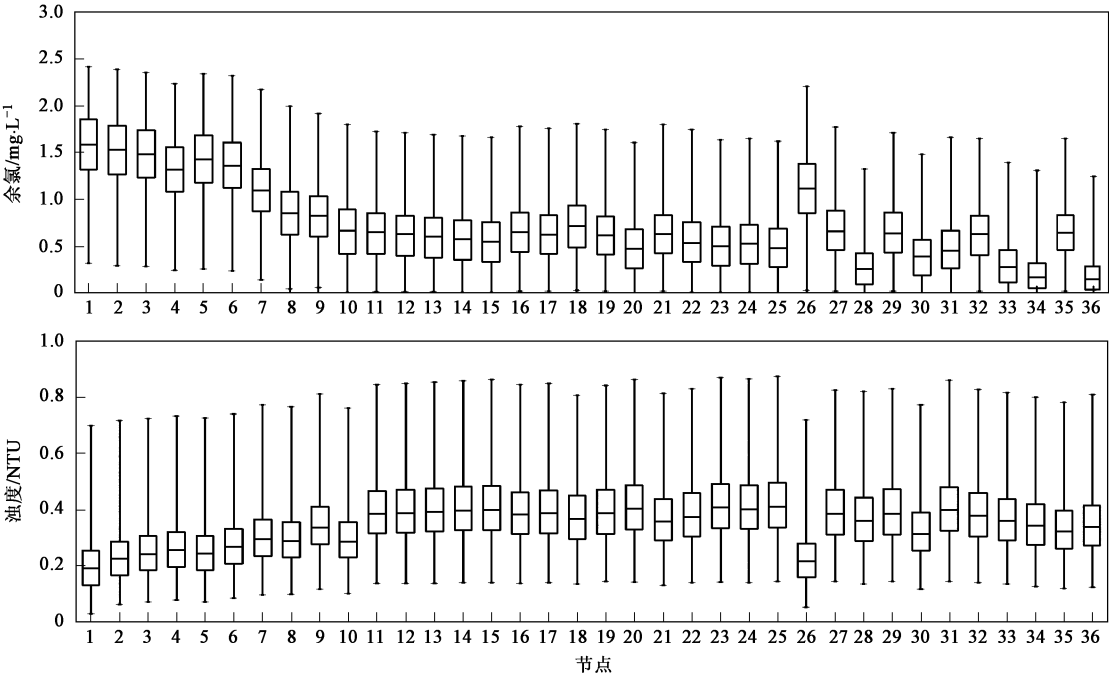


图 5 案例给水管网水质的统计特征

Fig. 5 Statistical characteristics of water quality in the studied water distribution system

3 结论

本研究基于 EPANET-MSX 工具包开发了机制性的多组分给水管网水质模型, 并利用管段模拟实验数据进行模型验证, 模型对余氯和浊度的模拟精度分别为 0.1 mg/L 和 0.3 NTU. 案例研究的模拟结果合理地反映了给水管网中余氯和浊度的动态变化特征. Monte Carlo 模拟的结果表明, 案例给水管网的余氯存在不同程度的不达标现象, 管网末梢部分节点的余氯达标率不能满足《生活饮用水卫生标准》中不低于 95% 的要求, 但整个管网的浊度均能达标. 该模型可进一步应用于评价给水管网中各种水质安全保障措施的效果, 如增加水厂出厂水余氯、管网中途补氯等.

参考文献:

[1] Walski T M, Chase D V, Savic D A, *et al.* Advanced water distribution modeling and management [M]. Waterbury: Haestad Methods Inc., 2003.

[2] Clark R M, Grayman W M, Males R M, *et al.* Modeling

contaminant propagation in drinking water distribution systems [J]. J Environ Eng ASCE, 1993, **119**(2): 349-364.

[3] Rossman L A, Boulos P F, Ahlman T. Discrete volume element method for network water quality models [J]. J Water Resour Manage ASCE, 1993, **119**(5): 505-517.

[4] Rossman L A, Clark R M, Grayman W M. Modeling chlorine residuals in drinking water distribution systems [J]. J Environ Eng ASCE, 1994, **120**(4): 803-820.

[5] Vasconcelos J J, Rossman L A, Grayman W M, *et al.* Kinetics of chlorine decay [J]. J Am Water Work Assoc, 1997, **89**(7): 54-65.

[6] Boxall J B, Saul A J. Modeling discoloration in potable water distribution systems [J]. J Environ Eng ASCE, 2005, **131**(5): 716-725.

[7] Le Pail M. Biostability in drinking water distribution systems study at pilot scale [D]. Orlando: University of Central Florida, 2004.

[8] Shang F, Uber J G, Rossman L A. EPANET Multi-species Extension User's Manual [R]. Cincinnati: US Environmental Protection Agency, 2007.

[9] Rossman L A. EPANET 2 Users Manual [R]. Cincinnati: US Environmental Protection Agency, 2000.

[10] 孙博. 给水系统水质风险模拟与管理策略研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.

[11] Rutledge S O. Disinfectant efficacy in distribution systems: A field

scale evaluation [D]. Halifax: Dalhousie University, 2003.

[12] Spear R C, Homberger G M. Eutrophication in Peel Inlet. II. Identification of critical uncertainties via generalised sensitivity analysis [J]. Water Res, 1980, **14**(1): 43-49.

[13] Beck M B. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty [J]. Water Resour Res, 1987, **23**(8): 1393-1442.

[14] 邓义祥, 陈吉宁, 杜鹏飞. HSY 算法在水质模型参数识别中的应用探讨 [J]. 上海环境科学, 2002, **21**(8): 497-500.

[15] 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.

[16] 李斌. 城市输配水管网水质变化的动态模拟 [D]. 长沙: 湖南大学, 2002.

[17] Osidle O O, Beck M B. Food web modelling for investigating ecosystem behaviour in large reservoirs of the south eastern United States: lessons from Lake Lanier, Georgia [J]. Ecol Model, 2004, **173**(2-3): 129-158.

[18] Rauch W, Vanhooren H, Vanrolleghem P A. A simplified mixed culture biofilm model [J]. Water Res, 1999, **33**(9): 2148-2162.

[19] Tsuno H, Hidaka T, Nishimura F. A simple biofilm model of bacterial competition for attached surface [J]. Water Res, 2002, **36**(4): 996-1006.

[20] Hidaka T, Tsuno H. Development of a biological filtration model applied for advanced treatment of sewage [J]. Water Res, 2004, **38**(2): 335-346.

[21] World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinkingwater Quality (Third edition): Volume 1 Recommendations [M]. Geneva: WHO, 2004.

[22] US Environmental Protection Agency. Guidance manual for compliance with the Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule: Turbidity Provision [R]. Washington DC: Office of Water (4607), 1999.

[23] US Environmental Protection Agency. Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule Turbidity Provisions: Technical Guidance Manual [R]. Washington DC: Office of Water (4606M), 2004.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址: <http://www.hjkk.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjkk@cees.ac.cn

网 址: www.hjkk.ac.cn