

基于水质特征因子和物理优化模型的污水管网地下水入渗解析与定位研究

赵志超, 尹海龙^{1*}, 郭龙天

同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; E-mail:zhao-zhao@outlook.com

摘要: 在高地下水位地区, 由于城市污水管网破损造成的地下水入渗不仅增加了污水处理厂、泵站的运行费用, 而且造成污水处理效率下降。此外, 增加的水力负荷会占据管道蓄容量, 严重影响系统的排洪防涝能力。然而地下水入渗点位分布广泛, 现有入渗诊断技术难以达到较好的识别精度, 开展大规模的管道修复工作势必造成人力和资金的浪费。因此, 建立一套科学的污水管网地下水入渗解析与定位方法具有重要意义。

本研究提出一种基于水质特征因子和物理优化模型的污水管网地下水入渗解析与定位研究方法, 探究污水管网地下水入渗的时空分布特征。首先, 采用基于化学质量平衡的水质特征因子法对污水管网系统进行总体的地下水入渗量解析, 识别出入渗严重区域; 其次, 对入渗严重区域建立基于 SWMM 的排水管网数学模型, 通过耦合微生物遗传算法, 搭建具有自反馈机制的动态寻优模型, 反演得到污水管网地下水入渗的时空分布, 并进行实地调研与验证。

关键词: 污水管网; 地下水入渗; 解析与定位; 动态寻优; 时空分布

1 引言

污水管道的地下水入渗已经成为城市水环境管理的重要问题。在高地下水位地区, 管道连接处和裂缝是地下水入渗的主要通道。根据已有研究表明, 污水管网中入渗的地下水量能够达到污水处理厂污水收集总量的 30~72%^[1-2]。显著增加的水力负荷, 不但提高了污水的输送成本, 而且降低了污水处理效率, 具有潜在的水环境污染风险。因此, 研究和提出一套科学有效的污水管网地下水入渗解析与定位技术, 对降低管网修复成本和提高修复效果具有重要意义。

目前, 污水管网地下水入渗解析与定位技术主要包含两类, 分别是基于物理成像系统的管道闭路电视和基于质量平衡的数学模型法。然而, 由于管道闭路电视不能在高水位工况下运行, 很难实现对整个系统入渗状况的评估。基于质量平衡的数学模型法则是通过构建系统中各组分间的物理、化学关系对未知变量进行求解。如最初采用的体积平衡法, 即通过测量管段上、下游的进出流量和旁侧入流量来求解地下水入渗量。然而, 通过流量体积法对污水管道的地下水入渗进行解析和定位, 需要布设密集的监测点位。此外, 该方法还受限于流量计的精度和采购成本, 难以大规模应用。

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2017ZX07206-001)

*通讯作者: 尹海龙 (1976—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为城市面源污染控制. E-mail: yinhailong@tongji.edu.cn

近年来, 基于水质特征因子的化学质量平衡模型开始应用于排水管网地下水入渗解析研究中。例如, 通过测定管道污水中硼酸盐^[3]、化学需氧量^[4]、总氮^[2,5]以及总磷等组分的浓度变化来解析地下水入渗量。此外, 稳定同位素技术也开始用于揭示污水管道中的水文变化过程, 以确定地下水入渗量和入渗来源^[1,6]。与流量体积法相比, 化学质量平衡模型可以基于更少的监测数据实现对管道破损区域的判别。例如, 当管段上、下游进出流量和水质数据已知时, 无需测定旁侧入流量即可求得地下水入渗量。虽然化学质量平衡模型成本更低, 但是为了进一步提高解析和定位精度, 仍然需要布设较多的监测点位, 大大增加了人力物力成本。因此, 如何在提供可靠空间入渗分布信息的同时, 尽可能减少监测次数, 是当前亟待解决的问题。

基于水动力和污染物归趋机制的建模方法, 可以通过合理布设监测点位实现对管网入流点位空间分布的解析。在配水管网中, 利用稀疏传感器网格建立的污染源位置识别方法通常只能考虑单个污染源位置。然而, 在城市污水管网中, 浅层地下水的入渗往往是由多处管道破损或裂缝导致的, 随着入渗点数量增加, 地下水入渗解析和定位的复杂性也随之增加。从理论上讲, 这类问题可以通过模型试错的方式来解决, 但是其调试次数会随着入渗点位的增加呈指数型增长, 人工操作的方式显然无法实现。因此, 本研究在基于水质特征因子的地下水入渗量解析基础上, 提出对破损严重区域搭建具有自反馈机制的寻优模型, 从而在计算机的帮助下进行全局动态寻优。

2 基于水质特征因子的污水管网地下水入渗量解析

图 1 给出了污水管网地下水入渗解析和定位模型的示意图, 包含基于水质特征因子的化学质量平衡模型和基于汇流过程的径流分割模型。

基于水质特征因子的化学质量平衡模型可用于全局水平的地下水入渗量解析。对于排水系统进出口处满足如下关系式:

$$Q_t = Q_s + Q_g \quad (1)$$

$$Q_t C_t = Q_s C_s + Q_g C_g \quad (2)$$

由式 (1) 和式 (2) 得:

$$Q_g = \frac{Q_t(C_s - C_t)}{C_s - C_g} \quad (3)$$

式中: Q_t 、 C_t 分别为污水管网排口的总出水量和水质指标浓度; Q_s 、 C_s 分别为污水管网接纳的生活污水量和水质指标浓度; Q_g 、 C_g 为污水管网入渗的地下水水量和水质指标浓度。

任一污水管网均可划分为若干子区域, 以管道 (j) 和管道 ($j+k$) 间的子区域为例, 其生活污水接纳量和地下水入渗量满足以下质量平衡关系:

$$Q_{(j)} = Q_{s,(j)} + Q_{g,(j)} \quad (4)$$

$$Q_{(j)} C_{(j)} = Q_{s,(j)} C_{s,(j)} + Q_{g,(j)} C_{g,(j)} \quad (5)$$

$$Q_{(j+k)} = Q_{s,(j+k)} + Q_{g,(j+k)} \quad (6)$$

$$Q_{(j+k)} C_{(j+k)} = Q_{s,(j+k)} C_{s,(j+k)} + Q_{g,(j+k)} C_{g,(j+k)} \quad (7)$$

式中： $C_{(j)}$ 、 $C_{(j+k)}$ 分别为管道(j)、管道(j+k)排放污水的水质特征因子浓度； C_s 、 C_g 分别为生活污水、地下水水质特征因子浓度， $C_{g(j)} = C_{g(j+k)} = C_g$ ， $C_{s(j)} = C_{s(j+k)} = C_s$ ； $Q_{(j)}$ 、 $Q_{(j+k)}$ 分别为管道(j)、管道(j+k)排放污水的流量； $Q_{s,(j)}$ 、 $Q_{g,(j)}$ 分别为管道(j)上游的生活污水总排放量和地下水总入渗量； $Q_{s,(j+k)}$ 、 $Q_{g,(j+k)}$ 分别为管道(j+k)上游的生活污水总排放量和地下水总入渗量。

根据式 (4) 至式 (7) 可得管道 (j) ~管道 (j+k) 区域的地下水入渗总量 $\Delta Q_g(y)$ ：

$$\Delta Q_g(y) = Q_{s,(j+k)} \times \frac{C_s - C_{(j+k)}}{C_{(j+k)} - C_g} - Q_{s,(j)} \times \frac{C_s - C_{(j)}}{C_{(j)} - C_g} \quad (8)$$

其中， $Q_g = \sum_{y=1}^n \Delta Q_g(y)$ 。

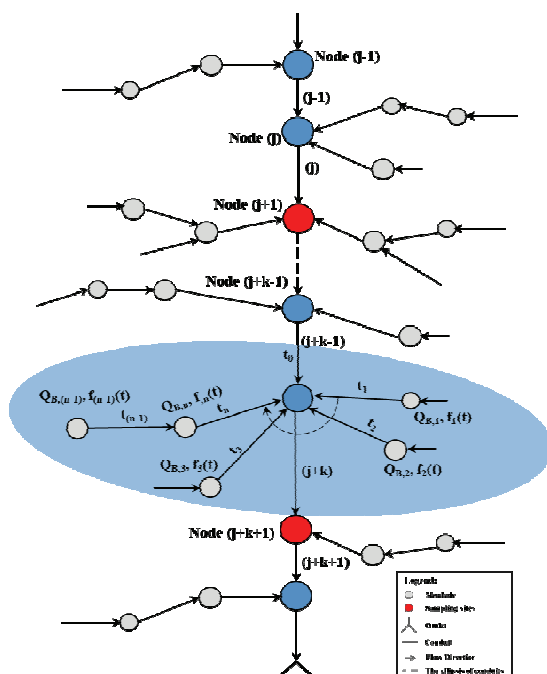


图 1 污水管网地下水入渗解析与定位模型原理

3 基于优化模型的污水管网地下水入渗解析与定位

3.1 入流与汇流模型

本研究采用 SWMM 构建排水系统模型。在 SWMM 中，污水管网的外部入流需要通过节点入流进行定义^[7]：

$$Q(t) = Q_B \times f(t) \quad (9)$$

式中， $Q(t)$ 为 t 时刻的节点入流量； Q_B 为基流量； $f(t)$ 为时变化系数。

节点是不同来源水体的汇集场所，并且因管网属性、排放特点和地形等差异导致汇流波形具有唯一性。该性质可用于反向解析入流水量的大小和点位。以管道 $(j) \sim$ 管道 $(j+k)$ 区域的地下水入渗为例，该区域的地下水入渗总量为 $\Delta Q_g(y)$ 。基于水量平衡可将 $\Delta Q_g(y)$ 随机分配到区域内的各个节点上，以汇流节点 $(j+k)$ 为例（如图 1 所示），满足以下关系式：

$$Q_{B(j+k)} \times f_{(j+k)}(t) = Q_{B,(j+k-1)} \times f_{(j+k-1)}(t-t_0) + Q_{B,(1)} \times f_{(1)}(t-t_1) + \dots + Q_{B,(n)} \times f_{(n)}(t-t_n) \quad (10)$$

式中， t_n 为水流从节点 n 传播到指定节点所需时间； t 为当前的模拟时间，当 $t < t_n$ 时， $f_{(n)}(t-t_n) = 0$ ； T 为模型完整模拟一次所需时间； $Q_{B,(n)}$ 、 $f_{(n)}(t)$ 分别为节点 n 的基流量和时变化系数。

3.2 优化求解算法

基于以上内容可知，理论上根据给定的目标函数可以实现对叠加波形的分割。然而，实际过程涉及大量参数，求解过程异常复杂。因此，本研究采用具有进化机制的遗传算法（GA）来解决最优化问题。GA 算法具有较好的鲁棒性和自组织与自适应能力，已被广泛应用于各个领域。根据应用环境不同，GA 算法往往有不同的变体。在本研究中，主要采用基于精英策略的微生物遗传算法（MGA）^[8] 来快速实现地下水入渗量的解析与定位，其基本原理如图 2 所示。

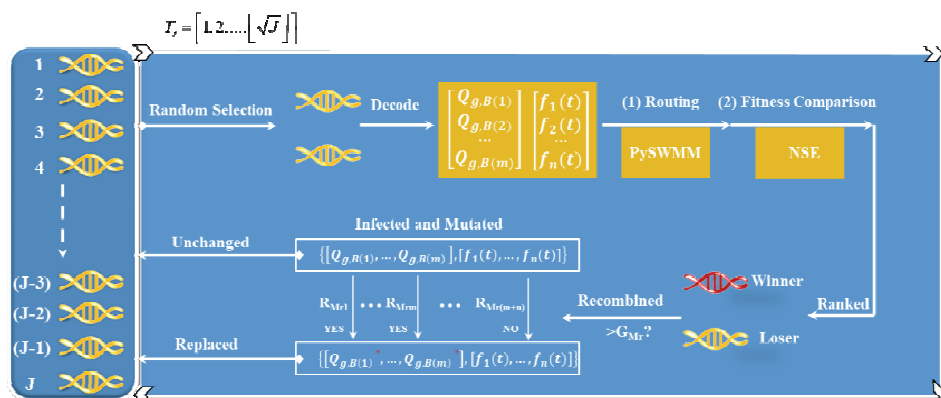


图 2 MGA 算法在地下水入渗解析与定位中的应用

每代种群均由 J 个个体组成，每个个体的遗传信息包括地下水入渗的基流量 $Q_{g,B}$ 和时变化系数 $f(t)$ 。由于研究区域不大，为了降低模型复杂度，本研究认为所有个体的地下水入渗的时变化系数相同。对任意种群满足以下关系（图 2）。

$$Q_{Tg} = \sum_{j=1}^{N_p} Q_{g,B(j)} \quad (11)$$

$$f(t) = f_i, t \in (24/n_i \times (i-1), 24/n_i \times i) \quad i=(1,2,\dots,n_i) \quad (12)$$

$$1 = \int_0^T f(t) dt \quad (13)$$

式中， Q_{Tg} 为研究区域地下水入渗总量； $Q_{g,B(j)}$ 为管段 j 的地下水入渗基流量； N_p 为管段数量； n_i 为时间离散数； f_i 为第 i 个时间段对应的入渗系数； T 为模型模拟时间。

本研究采用纳什效率系数 (NSE) 作为适应度评价指标。与传统的 GA 算法相比，MGA 算法引入了精英策略，通过随机抽取两个个体参加锦标赛，然后将适应度低的作为后代进行变异，将适应度高的保留在种群中。该竞争过程 (图 2) 可通过以下公式来表示：

$$\max_{T_i=[1,2,\dots,\lfloor\sqrt{J}\rfloor]} \left\{ [NSE]_{\text{indiv1,indiv2}} \right\}_{T_i} = \max \left\{ 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o(t) - Q_p(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o(t) - \sum_{t=1}^T Q_o(t)/T)^2} \right\}_{\text{indiv1,indiv2}} \quad (14)$$

式中， T_i 为锦标赛进行的次数； $\lfloor\sqrt{J}\rfloor$ 为每代锦标赛的总次数； $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整符号； $Q_o(t)$ 为 t 时刻污水处理厂进水流量观测值； $Q_p(t)$ 为 t 时刻污水处理厂进水流量模拟值； T 为模拟时间。

为了增加种群的多样性以及尽可能保留优胜个体的遗传信息，每次锦标赛后失败者能够部分继承优胜者的遗传信息，即随机产生的变异系数 R_{Mr} 大于给定的变异系数 G_{Mr} 时，继承当前信息；反之，则不继承。变异系数对保持种群多样性和防止提前收敛具有重要作用。因此，应综合考虑不同分布函数 (高斯分布、柯西分布、均匀分布等) 的特点，在避免局部最优解的同时，提高算法的全局搜索能力。

4 地下水入渗的解析与定位模型的搭建

本研究中的污水管网地下水入渗解析与定位模型是基于 PySWMM^[9] 来实现的，PySWMM 能够在 Python 开发环境下对 SWMM 中的模拟模块，节点模块、连接模块、汇水区模块和系统模块等进行调用，实现与 SWMM 运行文件的无缝交互。因此，本研究采用 SWMM 与 MGA 耦合的方式在模拟过程中植入自反馈调节机制，以实现模拟结果的动态寻优。该耦合模型能够自动设计各节点的入流方案，并在水量平衡和目标函数的约束下不断进行自反馈运算，最终得到最佳适应度下的最优解。基于以上分析可知，基于水质特征因子和物理优化模型的污水管网地下水入渗解析与定位研究方法在理论上具有较强的可行性。

参 考 文 献

- 1 Houhou J , Lartiges B S , France-Lanord C , et al. Isotopic tracing of clear water sources in an urban sewer: A combined water and dissolved sulfate stable isotope approach[J]. Water Research, 2010, 44(1):0-266.
- 2 徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙, et al. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. 同济大学学报

(自然科学版), 2016, 44(4).

3 Verbanck M A , Ashley R M , André Bachoc. International workshop on origin, occurrence and behaviour of sediments in sewer systems: Summary of conclusions[J]. Water Research, 1994, 28(1):0-194.

4 Kracht O , Gujer W . Quantification of infiltration into sewers based on time series of pollutant loads.[J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2005, 52(3):209-18.

5 Shelton J M , Kim L , Fang J , et al. Assessing the Severity of Rainfall-Derived Infiltration and Inflow and Sewer Deterioration Based on the Flux Stability of Sewage Markers[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(20):8683-8690.

6 Kracht O , Gresch M , Gujer W . A Stable Isotope Approach for the Quantification of Sewer Infiltration[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(16):5839-5845.

7 Rossman L A. Storm Water Management Model User's Manual[J]. 2009.

8 Harvey I . The microbial genetic algorithm.[J]. 2009.

9 Bryant E. McDonnell, Gonzalo Peña-Castellanos, Katherine Ratliff. 2016. Pyswmm[OL]. <https://pyipi.org/project/pyswmm/0.3/>.

Pin-pointing groundwater infiltration into sewer network using chemical marker in conjunction with physical based optimization model

ZHAO Zhi-chao, YIN Hai-long, GUO Long-tian

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai, China, 200092.

Email: zhao-zchao@outlook.com)

Abstract: In areas with high water table, the groundwater infiltration caused by the breakage of urban sewage pipe network will not only increase the operating costs of wastewater treatment plants and pumping stations, but also reduce the treatment efficiency. In addition, the increased hydraulic load will occupy the pipeline storage capacity, seriously affecting the flood discharge and waterlogging control capacity of the system. However, groundwater infiltration locations are widely distributed, and the existing infiltration diagnosis technologies are difficult to achieve better recognition accuracy. Large-scale pipeline repair work will inevitably result in waste of manpower and funds. Therefore, it is of great significance to establish a scientific analytical and pin-pointing method of groundwater infiltration in sewage network.

In this study, an analytical and pin-pointing method based on chemical marker and physical optimization model is proposed to explore the temporal and spatial distribution characteristics of groundwater infiltration into sewage pipe network. Firstly, the chemical marker is used to analyze the groundwater infiltration at the global and local level respectively to identify the areas with serious infiltration problem. And then, a mathematical model of sewage pipe network based on SWMM is established for the areas. By coupling microbial genetic algorithm, a dynamic optimization model with self-feedback mechanism is built to retrieve the temporal and spatial distribution characteristics of groundwater infiltration. Finally, the feasibility of this method is determined by field investigation.

Key words: sewage pipe network; groundwater infiltration; analysis and pin-pointing; dynamic optimization; spatial and temporal distribution.