

黄莺, 刘梦茹, 魏晋果, 等. 基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 32–36. [HUANG Ying, LIU Mengru, WEI Jinguo, et al. Research on Urban Metro Network Recovery Strategy Based on Resilience Curve[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 32–36. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.01.007.]

基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究*

黄 莺^{1,2}, 刘梦茹¹, 魏晋果¹, 熊文文¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 国家级土木工程虚拟仿真实验教学中心, 陕西 西安 710055)

摘 要: 为了提高城市地铁网络的韧性, 基于复杂网络理论和韧性城市理论, 研究地铁网络在不同失效场景下的最优恢复策略。用 Space L 方法和 Gephi 软件构建地铁网络, 以网络平均效率为韧性指标, 以网络恢复力最大为目标函数构建城市地铁网络恢复模型, 用遗传算法进行求解。最后以西安地铁网络为例, 用 Matlab 模拟了其在小规模和大规模站点失效场景下的最优恢复策略。研究结果表明: 西安市地铁线网中站点之间联系程度有待加强; 放射性线网与中心线网的交点为地铁网络中的脆弱性站点; 度相同或不同站点失效下, 优先恢复的站点与其介数相关; 不同规模站点失效下, 用遗传算法求解城市地铁网络的最优恢复策略均具有较高求解效率。

关键词: 地铁交通; 复杂网络; 韧性城市; 遗传算法; 恢复策略

中图分类号: TU984.191; X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)01–0032–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.01.007

随着我国城镇化率的提高, 城市人口大量聚集, 城市系统日趋复杂^[1]。地铁由于其便捷、高效、环保的特点缓解了城市交通的压力, 扩大了城市容量。但随着地铁规模的扩大, 地铁事故也不断增加, 包括地震、飓风、火灾等自然灾害, 运营中的异常故障以及恐怖袭击等人为事件^[2]。单个站点的突发事故会通过地铁网络扩散至其他路线, 进而影响整个路网的安全有效运营^[3]。而在站点或区间失效时, 恢复地铁网络必要的连通性能够保障后续恢复工作的效率。因此, 根据有限的应急资源制定合理的恢复策略对提高地铁网络的恢复能力具有重大意义。

城市地铁网络的传统研究为运用复杂网络理论研究地铁网络在不同攻击模式下的脆弱性及鲁棒性。王志如等^[4]提出基于换乘次数的脆弱性评价指标, 指出车站和区间在蓄意攻击下的脆弱性及鲁棒性; 薛锋等^[5]构建成都地铁网络节点重要度评价指标体系, 识别出网络中度或介数不高的关键节点; SUN Daniel 等^[6]采用客流变化、平均路径长度、网络效率三个综合指标从线路运营角度评估网络脆弱性, 表明客流量是造成网络脆弱性的关键因素。许葭等^[7]分析了地铁事故的蔓延机理, 构建了地铁网络事故蔓延引力模型, 根据事故点与其他点之间的引力大小确定应急响应决策。随着韧性城市研究的兴起, 韧性理论在地铁安全领域的应用也受到了关注, 主要以客流量^[8]、网

络连通性^[9]、网络效率^[10]等因素为韧性指标, 分析地铁网络在不同中断场景下的韧性水平。现有研究通过量化韧性指标研究了地铁网络的脆弱性及韧性, 而在事故发生后如何合理安排站点及区间的恢复顺序对城市地铁网络的恢复起着关键作用, 但此方面的研究还较少。

笔者基于复杂网络理论和韧性城市理论, 以网络的平均效率为韧性指标, 通过模拟不同站点失效下网络效率变化识别出网络中关键站点。在不同规模站点失效场景下, 根据不同恢复策略网络恢复力大小, 以恢复力最大为目标函数构建城市地铁网络恢复模型, 引入遗传算法求解最优恢复策略, 以期在城市地铁网络在运营期间的应急管理提供参考。

1 网络性能评价

1.1 网络构建

复杂网络的构建方法有 Space L 和 Space P 两种。Space L 方法是指拓扑图中的节点对应于实际地铁线网中的站点, 边对应于站点之间的线路, 若两个站点相邻, 则对应的节点之间存在边。由于 Space L 方法更接近实际地铁线网情况, 采用 Space L 方法构建地铁网络拓扑结构图, 根据实际

* 收稿日期: 2020–06–30 修回日期: 2020–09–22

基金项目: 西安市建设科技计划项目(SJW2017–02)

第一作者简介: 黄莺(1979–), 女, 汉族, 河北邢台人, 博士, 副教授, 主要从事城市地铁网络安全研究。

E-mail: mrluxauat@163.com

线网中站点连接关系, 用 Gephi 软件绘制网络图。

1.2 网络性能指标

轨道交通网络可以用无向无权图 $G = (V, W)$ 表示, V 为节点集合, 表示网络中的所有站点; W 为边集合, 表示站点间的区间。为了描述网络的节点重要性、连通性等相关性能, 通常引入平均路径长度、介数、网络效率等指标。其相关计算公式及参数符号说明如表 1、表 2 所示。

表 1 网络指标计算公式

网络指标	计算公式
度	$k_i = \sum_j a_{ij} \quad (1)$
平均路径长度	$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (2)$
直径	$D = \max \{d_{ij}\} \quad (3)$
介数	$B_i = \sum_{\substack{1 \leq j \leq N \\ j \neq i}} [n_{jl}(i)/n_{jl}] \quad (4)$
网络效率	$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (5)$
网络韧性	$R = \frac{\int_{t_0}^{t_1} E_f(t) dt}{(t_1 - t_0) E_f^0} \quad (6)$

韧性是指系统受到外部扰动时的抵抗、吸收能力以及扰动后快速恢复的能力^[11], 网络韧性是衡量网络在保持连通时允许破坏的节点上限数量的定量方法^[12]。在城市韧性研究方面, 主要借助“韧性曲线”的概念对系统韧性进行表征, 如图 1 所示, 该曲线以时间作为横轴、以系统功能水平作为纵轴, 反映系统功能水平随时间变化的情况, 进而定义系统韧性水平^[13], 同时通过韧性三角形^[14]的值来量化系统受到干扰后的韧性损失。在“韧性曲线”基础上, 韧性指标可定义为系统在受到干扰至恢复到初始状态期间网络性能与初始网络性能的比值^[10], 其计算公式及相关参数说明见表 1、表 2。

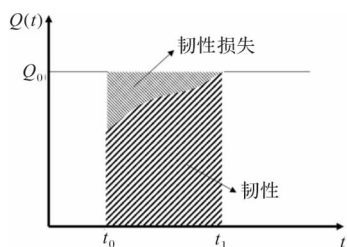


图 1 韧性曲线

2 城市地铁网络恢复优化模型

2.1 问题描述与模型假设

采用文献[10]的方法计算网络恢复力, 假设如下:

(1) 节点破坏后网络效率立刻降到最低, 随着恢复措施的实施逐渐上升;

(2) 站点破坏后与其相连的区间相应失效;

(3) 每个站点恢复时间相同为 Δt , 且每阶段只对一个站点进行恢复;

(4) 恢复措施结束后网络效率 E_f 恢复到初始状态。

如图 2 所示, 当节点 3, 7, 12, 15 发生故障时, 与之相连区间被移除, 如何合理安排破坏站点的恢复顺序是评估网络恢复力的关键。

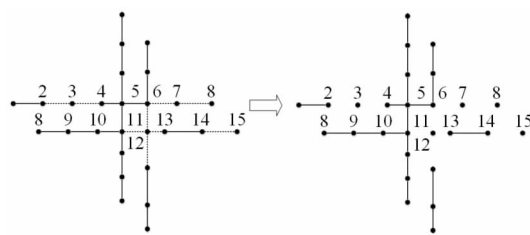


图 2 节点故障示意图

假设选择的恢复顺序为 3-12-15-7, 即第一阶段恢复节点 3 和与之相连的连边, 第二阶段恢复节点 12 和与之相连的连边, 以此类推, 则任意恢复策略的恢复力可表示为:

$$R(m) = \frac{\sum_{r=1}^s (E_{f(r-1)} + E_{fr})}{2 \times s \times E_f^0} \quad (7)$$

式中: $R(m)$ 表示恢复策略 m 的恢复力, E_{fr} 表示第 r 阶段恢复完成后网络性能, s 为破坏节点个数。

2.2 模型求解算法

由上可知, 随着破坏站点的增多, 恢复方案将呈指数方式增长。遗传算法对于任意非线性约束条件下的任意目标函数, 在任意的离散、连续或混合的搜索空间中均可搜索全局最优解^[15], 已用于求解许多 NP 完全问题的优化, 包括 TSP 问题、产品的生产安排问题等。因此, 选择遗传算法求解城市地铁网络最优恢复策略。目标函数为:

$$\max(R(m)) = \max \frac{\sum_{r=1}^s (E_{f(r-1)} + E_{fr})}{2 \times s \times E_f^0} \quad (8)$$

表 2 符号说明

符号	含义	符号	含义
V	地铁网络中所有站点的集合	n_{jl}	节点 j 和节点 l 之间的最短路径数量
W	地铁网络中站点之间区间的集合	$n_{jl}(i)$	节点 j 和节点 l 之间的最短路径中经过节点 i 的数量
A	故障发生后, 地铁网络中失效节点集合, $A \subseteq V$	t_0	网络受到干扰的时刻
i, j, l	节点 i , 节点 j , 节点 l	t_1	网络恢复至初始状态的时刻
N	节点个数, $N = V $	$E_f(t)$	t 时刻的网络性能
a_{ij}	邻接矩阵, 当节点 i 和节点 j 相连接时 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$	E_f^0	网络未受到干扰时的初始性能
d_{ij}	连接节点 i 和节点 j 的最短路径上的边的数量	—	—

(1) 编码

采用整数编码方法, 对 n 个站点破坏的网络恢复问题, 染色体分为 n 段, 其中每一段为对应破坏站点的编号, 如 2.1 小节中 {3 7 5 12} 即为一个合法的染色体, 代表一种恢复策略。

(2) 适应度函数

适应度函数越大的染色体越优质, 城市地铁网络恢复模型是求解最大恢复力的过程, 因此适应度函数与目标函数相同。

(3) 选择交叉操作

选择操作中根据个体适应度值以一定概率选择个体到新群体中。交叉操作中确定进行操作的父代后, 将父代样本两两分组, 进行交叉操作, 交叉后采用部分映射的方法消除个体中的重复站点编号(图3)。

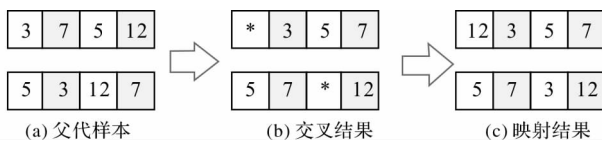


图3 交叉操作过程

(4) 变异逆转操作

变异操作中随机选取两个点, 将其对换位置。为改善遗传算法的局部搜索能力, 在选择、交叉、变异之后引进连续多次的进化逆转操作, 即将每个个体的任意两段进行交换位置, 保留适应度提高的优良个体。

3 算例分析

西安地铁是我国西北地区第一个城市轨道交通系统, 其第一条线路于 2011 年 9 月 16 日开通试运营。根据西安市城市轨道交通第三期建设规划, 预计到 2025 年, 将形成 12 条线路运营、总长 423 km 的“棋盘+环+放射”型网络主体结构。根据西安市地铁线网实际情况, 选取第三期规划线网分析其网络性能, 模拟在不同规模站点失效下西安地铁网络的最优恢复策略。

3.1 网络性能分析

根据实际站点和区间之间对应关系, 用 Gephi 绘制西安市地铁网络拓扑结构图并进行网络性能参数计算。网络拓扑结构图如图 4 所示, 网络性能参数计算结果如表 3 所示。根据站点之间对应关系构建网络的邻接矩阵, 用 Matlab 计算网络度分布并绘制度分布图, 如图 5 所示。所使用的 Gephi 软件版本为 Gephi0.9.2, Matlab 软件版本为 Matlab R2016b。

表3 网络性能参数计算结果

网络性能参数	2025 年
节点/个	236
边/条	263
平均度/个	2.29
平均最短路径长度/条	15.019
直径/条	46
平均聚类系数	0

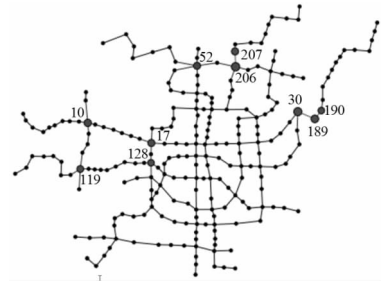


图4 西安地铁网络拓扑结构图

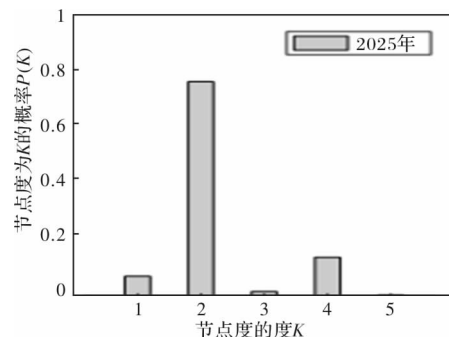


图5 网络度分布图

根据网络性能参数计算结果, 西安市地铁线网为由 263 条边相连的 236 个站点构成。网络平均最短路径长度为 15.019, 直径为 46, 平均聚类系数为 0。表明随着西安市地铁线网规模的扩大, 各站点间的联系程度仍较低。这与网络的结构形式相关, 西安市地铁网络拓扑结构的布局为“放射性”和“棋盘形”, 局部网络中不存在三元组的结构, 降低了节点之间的密切程度。

为了分析西安市地铁线网的脆弱性, 用 Matlab 模拟了每个站点失效的场景下网络效率的变化, 根据网络效率变化排序识别出前 10 个脆弱性较高的站点(表 4), 并在网络拓扑图中标识。可以看出, 西安市地铁线网前 10 个脆弱性站点中均存在着度为 2, 3, 4, 5 的站点, 因此, 站点的度不能决定其脆弱性, 这与文献[10]的结论相同。根据西安市地铁网络拓扑结构图, 前 10 个脆弱性站点大都位于“棋盘式”线网和“放射性”线网的交点处, 一旦这些站点失效, “放射性”线网上的站点与“棋盘式”线网站点的可达性将不能保证, 这是西安市地铁线网脆弱性的主要原因。

表4 前 10 个脆弱性站点

排名	站点名称	节点编号	度	介数
1	学府路	206	4	0.307 6
2	北客站	52	5	0.334 9
3	上林路	10	4	0.250 7
4	开远门	17	4	0.505 7
5	纺织城	30	3	0.236 2
6	香王	189	2	0.209 0
7	纺园三路	190	2	0.193 8
8	新桃园	128	4	0.439 2
9	东风路	207	2	0.147 3
10	张旺渠	119	4	0.166 5

3.2 小规模站点失效下恢复策略求解

为研究度与恢复策略的关系, 分别选取 5 个度相同和度不相同的站点失效下进行恢复策略求解。

在度相同站点中选取编号为 13(三桥)、42(永宁门)、84(航天大道)、189(香王)、207(东风路)5 个度为 2 的站点进行模拟, 在度不同站点中选取编号为 52(北客站)、43(钟楼)、30(纺织城)、62(北池头)、202(秦汉大道)5 个度分别为 3、4、5、2、1 的站点进行模拟。根据破坏站点数量可计算出在两种站点失效场景下, 均存在 120 种恢复策略, 失效节点的增加提高了求解恢复策略的计算量, 因此, 引入遗传算法进行求解, 通过交叉、变异操作产生不同的恢复策略, 经多次试验, 种群大小取 20, 最大遗传代数为 50, 交叉概率为 0.9, 变异概率 0.05, 代沟为 0.9。进化过程图如图 6 所示。

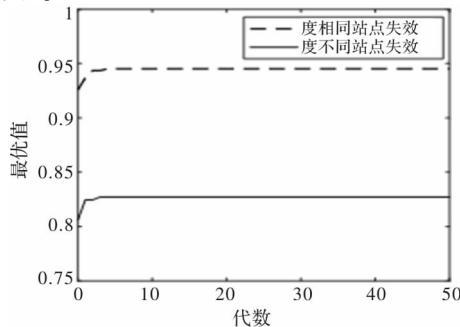


图6 两种失效场景下恢复策略优化过程

在选取的 5 个度相同的站点失效场景下, 最优恢复策略为 189-207-13-42-84, 最大恢复力为 0.945 2。在选取的 5 个度不同的站点失效场景下, 最优恢复策略为 52-43-62-30-202, 最大恢复力为 0.827 3, 求解时间分别为 320 s 和 298 s。可以看出, 两种失效场景下恢复策略优化过程均在 10 代以前达到了最优解, 因此, 在种群规模较小时用遗传算法求解城市地铁网络最优恢复策略较高的求解效率。根据求解结果不难发现, 在两种失效场景下, 优先恢复的站点均为网络中介数较大的站点, 因此站点的恢复顺序与其对网络的贡献相关^[10]。

3.3 大规模站点失效下恢复策略求解

为保证遗传算法在求解大规模站点失效下网络最优恢复策略的效率, 选取前 10 个脆弱性站点进行模拟。遗传算法中种群大小为 20, 最大遗传代数为 100, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.05, 代沟为 0.9, 进化过程如图 7 所示。

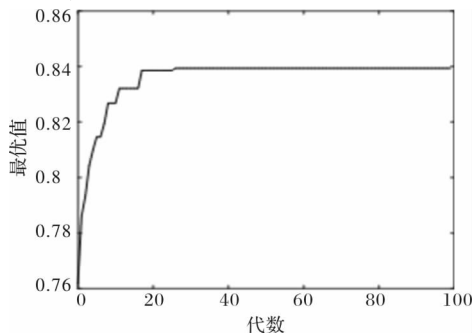


图7 大规模站点失效下恢复策略优化过程

初始种群的最优恢复策略为 206-190-128-189-119-30-10-52-17-207, 网络恢复力为 0.7619。经过 100 次迭代, 在第 26 代达到最优。最优恢复策略为 128-17-10-52-119-206-207-30-190-189, 最大恢复力为 0.839 4。根据初始种群和最优结果的恢复策略, 分别绘制其恢复过程的

韧性曲线, 如图 8 所示。结果表明, 经过遗传算法多次迭代求解, 网络最大恢复力得到了提高, 韧性损失也相应减小。因此, 用遗传算法求解大规模站点失效下网络最优恢复策略仍能保证求解效率。

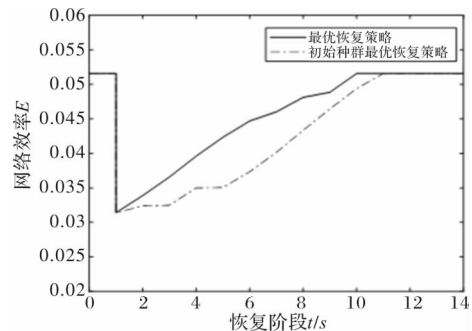


图8 最优恢复策略的韧性曲线图

4 结论

(1) 基于复杂网络理论, 得到西安地铁网络的平均度为 2.29, 平均最短路径长度为 15.019, 直径为 46, 平均聚类系数为 0, 表明西安地铁网络站点之间联系程度有待加强, 在地铁线网规划中应考虑三元组结构, 加强站点间联系程度。

(2) “放射性”线网与“棋盘式”线网的交点为地铁网络中的脆弱性站点, 在后期线网建设中应考虑其应急资源配置; 不同规模站点失效场景下, 网络的最优恢复策略中优先恢复的站点与其介数相关。

(3) 种群规模和迭代次数较小时, 用遗传算法求解不同规模站点失效场景下城市地铁网络的最优恢复策略具有较高的求解效率。

(4) 研究结果可为西安市及其类似城市地铁的规划建设及运营中应急方案的制定提供参考。地铁网络的恢复策略与地铁线网的物理特征相关, 同时系统外部因素如人力、资源等因素也决定着恢复策略的制定, 今后应结合相关因素进行深入研究。

参考文献:

- [1] 刘严萍, 王慧飞, 钱洪伟, 等. 城市韧性: 内涵与评价体系研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 8-12.
- [2] LIU W, SONG Z. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019: 106617.
- [3] 陈文瑛, 杨金渝, 何世伟. 地铁运营突发事件风险传播规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(7): 86-91.
- [4] 王志如, 李启明, 梁作论. 城市地铁网络拓扑结构脆弱性评价[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(8): 114-119.
- [5] 薛锋, 何传磊, 黄倩. 成都地铁网络的关键节点识别方法及性能分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(1): 93-99.
- [6] SUN D J, GUAN S. Measuring vulnerability of urban metro network from line operation perspective[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 348-359.
- [7] 许霞, 宋守信, 翟怀远, 等. 基于脆弱性的地铁网络事故蔓延模型构建研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(3): 96-101.
- [8] D'LIMA M, MEDDA F. A new measure of resilience: An application to the London Underground[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 81: 35-46.
- [9] ZHANG X, MILLER-HOOKS E, DENNY K. Assessing the role of network topology in transportation network resilience[J]. Journal of Transport Geography, 2015, 46: 35-45.
- [10] ZHANG D, DU F, HUANG H, et al. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example[J]. Safety Science, 2018, 106: 230-243.

- [11] NAN C, SANSAVINI G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 157: 35–53.
- [12] HENRY D, RAMIREZ – MARQUEZ J E. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 99: 114–122.
- [13] 李瑞奇, 黄弘, 周睿. 基于韧性曲线的城市安全韧性建模[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2020, 60(1): 1–8.
- [14] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake spectra*, 2003, 19(4): 733–752.
- [15] 王金贺, 张晓红, 曾建潮. 非完美维修模型下的风电机组最优维修决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(5): 1151–1160.

Research on Urban Metro Network Recovery Strategy Based on Resilience Curve

HUANG Ying^{1,2}, LIU Mengru¹, WEI Jinguo¹ and XIONG Wenwen¹

(1. *School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;*

2. *National Experimental Teaching Center for Civil Engineering Virtual Simulation(XAUAT), Xi'an 710055, China)*

Abstract: In order to improve the resilience of the urban metro network, the optimal recovery strategy of the metro network under different failure scenarios is studied based on the complex network theory and the resilient city theory. The Space L method and Gephi software are used to model the metro network and the average efficiency of the network is used to quantify resilience. The maximum resilience of the network is used as the objective function to establish the recovery model of metro network and GA(genetic algorithm) is adopted to identify optimal recovery strategy. Finally, a numerical example is used to illustrate the procedure and the effectiveness of the proposed method. The results of the study indicate that the connection between stations in the Xi'an metro line network is low and the intersection of the radioactive line and the central line is the vulnerable station of the metro network. Moreover, the priority site to restore is related to its betweenness rather than degree. In addition, the network resilience of different recovery strategies is obviously different under the different failure scenarios and the proposed method can be used to identify the optimal recovery strategy.

Key words: urban transportation; complex network; resilience city; genetic algorithm; recovery strategy

(上接第 31 页)

Control of Pollutant Migration and Transformation in Regional Water Environment after Flood Disaster

REN Bingnan^{1,2} and LU Haiqiang³

(1. *Zhaimingguo Academician Workstation, Sanya University, Sanya 572000, China;*

2. *School of Health Industry Management, University of Sanya, Sanya 572000, China;*

3. *School of Chemistry and Bioengineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 300021, China)*

Abstract: When a flood occurs, a large amount of flood water will carry sewage and various types of garbage, resulting in increased pollutants in the water body and serious damage to the ecological environment. Based on this, the control of pollutant migration and transformation in regional water environment after flood disaster is proposed. First, to analyze the adsorption mechanism of pollutants, establish adsorption kinetic equations and isotherm models, determine the speed of pollutants in the removal of volatiles, and calculate the degree of volatile losses; second, comprehensively explore through convection, molecular diffusion, radioactive decay, etc. The basic laws of pollutant migration and transformation, obtaining migration and transformation equations, and constructing mathematical models; taking Sanya as an example, using migration model to control scheme generation and combination, scheme selection and optimization, determine the best control method, and use the Granger multiplier rule Calculate the control rate of pollutants. The actual results show that the designed scheme combined with multi-objective combination optimization makes the control scheme more in line with the actual situation, thereby minimizing the pollution of the water body environment by flood disasters.

Key words: flood disaster; water environment pollution; migration and transformation; multi-objective combination optimization; grange multiplier rule