

任丙南, 卢海强. 洪涝灾害后区域水环境中污染物迁移转化控制研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 28–31, 36. [REN Bingnan and LU Haiqiang. Study on the Control of Pollutant Migration and Transformation in Regional Water Environment after Flood Disaster [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 28–31, 36. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.006.]

洪涝灾害后区域水环境中污染物迁移转化控制研究^{*}

任丙南^{1,2}, 卢海强³

(1. 三亚学院 瞿明国院士工作站, 海南 三亚 572000; 2. 三亚学院 健康产业管理学院, 海南 三亚 572000;
3. 太原科技大学 化学与生物工程学院, 山西 太原 300021)

摘 要: 洪涝灾害发生后, 大量洪水会携带污水与各类垃圾, 以及形成的径流冲刷, 将导致水体中的污染物明显增加, 严重破坏生态环境。以多环芳烃为例进行了洪涝灾害后区域水环境中污染物迁移转化控制研究, 分析污染物吸附机理, 分别建立吸附动力学方程与等温线模型, 确定污染物在挥发去除作用中的速度, 计算挥发损失程度; 并结合对流作用、分子扩散、放射性衰变等方面的影响, 构建迁移数学模型; 以海南省三亚市为例, 利用迁移模型对多环芳烃的控制方案进行筛选与优化, 通过格朗日乘数法计算多环芳烃的控制率。研究结果表明, 多环芳烃控制方案结合了多目标组合优化, 使控制方案更符合实际情况, 从而最大程度上减少洪涝灾害对水体环境的污染。

关键词: 洪涝灾害; 水环境污染; 迁移转化; 多目标组合优化; 格朗日乘数法则

中图分类号: TU46⁺¹; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)01-0028-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.006

在洪涝灾害发生时, 强降雨产生的径流激增, 地表及土壤中的污染物被带到河水中, 再加上洪涝灾害导致的水流扰动, 使得沉积在底泥中的污染物再悬浮, 导致水环境中污染物含量大大增加, 然而这些污染物经过水体的自净与沉淀, 随着水中含沙量沉降而减少, 因此, 在洪水发生回落时, 污染物含量会有所减少; 在水量接近平时, 也会由于其它污水汇聚, 使污染物含量急剧上升。由于洪涝灾害极大的干扰着水环境的水文、水动力条件以及水环境中的污染物含量, 必然影响着PAHs在水环境中的迁移转化过程。多环芳烃(PAHs)是一类分布较广的化学污染物^[1], 除了一些自然活动会产生一定量的PAHs外, 主要来源于人类活动中有机物的不完全燃烧, 如工业和生活中煤炭/石油/生物质燃烧、垃圾焚烧和车辆尾气排放等。目前人为源逐渐成为环境中PAHs的主要贡献者^[2]。虽然PAHs在环境介质中以微量存在, 但由于PAHs的长距离迁移能力, 导致在环境中广泛、持久的存在, 并通过呼吸道、消化道、皮肤接触等多种途径进入人体, 累积产生致癌、致畸以及致突变的作用^[3], 因此长期以来引起了世界各国的广泛关注。

PAHs属于持久性有机污染物, 在环境中不易降解, 因此在大气、水、土壤和沉积物中均有分布, 在沉积物和土壤中浓度最高, 大气中的浓度

最低, 水体居中^[4]。土壤中的PAHs可通过淋溶作用、地表径流实现在水相、气相间的迁移。PAHs在水中有多种迁移转化途径, 包括在沉积物表面的吸附-解吸、挥发和沉降、光解、氧化还原、水生植物的吸收及微生物降解等^[5], 进而影响其在环境中的分布。水中的PAHs可通过挥发重新进入大气, 成为当地和周边地区空气中PAHs的重要来源^[6]。

因此, PAHs广泛存在于自然环境中, 存在难降解、易富集的特点, 对人类健康与生态环境造成严重威胁。洪涝灾害所引起的水流扰动和严重的水流冲刷, 均严重的影响了PAHs在不同介质中的分布、迁移等过程, 对区域水环境中PAHs迁移转化控制进行研究具有重要的意义。海南省三亚市地处热带低纬度地区, 台风天气带来的暴雨频繁, 强降雨引起的洪涝灾害对当地的水环境中的污染物迁移转换有显著的影响。本文以PAHs为例, 通过分析污染物的吸附和挥发作用, 建立吸附动力学模型, 计算挥发速度; 其次, 探究污染物迁移变化规律, 获取迁移转化方程^[7]; 利用多目标组合优化对控制方法进行选取; 最后利用迁移模型对多环芳烃的控制方案进行筛选与优化, 通过格朗日乘数法计算多环芳烃的控制率, 验证所提方法的科学合理性。

^{*} 收稿日期: 2020-07-07 修回日期: 2020-09-27

基金项目: 三亚市院地科技合作项目(2019YD04); 海南省自然科学基金项目(413128)

第一作者简介: 任丙南(1978-), 男, 汉族, 山西忻州人, 博士, 教授, 主要从事污染物污染行为与环境效应研究。

E-mail: renbingnan158@sina.com

1 污染物的吸附与挥发作用分析

污染物在水体颗粒物中的吸附是迁移变化的主要途径。图 1 为 PAHs 在地表水中的迁移转化方式:

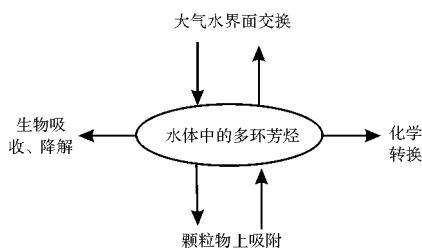


图 1 PAHs 迁移转化方式示意图

1.1 吸附机理

水体中存在的悬浮颗粒物可以吸附或释放 PAHs。由于水流的扰动作用, PAHs 会渐渐吸附到颗粒物中, 在水体环境出现较大变化时, PAHs 会在颗粒物中解析出来, 给水体带来二次污染^[8]。

悬浮颗粒物主要由黏土矿物与有机质构成, 其中, 有机质是吸附的主要介质。PAHs 的吸附具有两种作用机理分别为: 表面吸附, 指颗粒物中存在的矿物质对其表面的吸附; 另一种为分配作用, 指有机质对 PAHs 的溶解。

1.2 吸附动力学

吸附动力学方程能够表示 PAHs 从水中吸附到悬浮颗粒物上的全部过程, 常用的吸附动力学方程如表 1 所示, 等温线模型表如表 2 所示。

表 1 吸附动力学方程表

序号	名称	方程式	吸附质
1	一级动力学方程	$\ln\left(\frac{q_1}{q_e}\right) = Kt$	萘和菲
2	二级动力学方程	$q_t = \frac{q_e^2 Kt}{1 + q_e Kt}$	萘和菲
3	Elovich 方程	$q_t = b + k \ln t$	菲
4	双常数方程	$\ln q_t = b + K \ln t$	菲
5	扩散方程	$q_t = b + kt^{\frac{1}{2}}$	菲

表 2 等温线模型表

序号	模型名称	方程式
1	Henry 线性等温式	$Q_e = k_d C_e$
2	Freundlich 吸附等温式	$Q_e = k_f C_e^n$
3	Langmuir 吸附等温式	$Q_e = \frac{abC_e}{1 + bC_e}$
4	BET 模型	$\frac{C_e}{Q_e(C_0 - C_e)} = \frac{1}{X_m A} + \frac{(A-1)C_e}{X_m C_0 A}$
5	DMM 双模式模型	$Q_e = \frac{abC_e}{1 + bC_e} + k_d C_e$
6	DRM 双模式模型	$Q_e = k_d C_e + k_f C_e^n$

1.3 挥发去除作用

挥发过程就是气液平衡过程。在气液两相系统中, 气体存在于气相中的分压和此气体在液态中的浓度有着正比关系。若该气相分压低于平衡

分压时, 溶质成分就会从液态向气态转换^[9]。平衡分压速度与气相分压的差值决定转换速度。气液相平衡条件随着温度与接触情况发生改变。针对已知物系, 可以通过调整水温, 采用负压操作, 扩大气液相接触面积, 减少转换阻力, 从而提高转化速度的目的。对于一些污染物, 特别是容易挥发的物质, 其挥发速度的计算公式表示为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -Kv(c - P/H)/Z = -Kv'(c - P/H) \quad (1)$$

式中: c 表示液相中污染物浓度情况, Kv 为挥发速率常数, Kv' 代表洪涝灾害后混合水体的挥发速度, Z 描述水体的混合深度, P 表示水体表面污染物在大气中存在的分压, H 属于亨利常数。

通常情况下, 污染物在水中的大气分压表示为零, 则上述公式可以简化为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = Kv'c \quad (2)$$

亨利定律核心为在化学物质的气液相实现平衡时, 溶解在水中的浓度和污染物浓度相关, 二者关系可以表示为:

$$P = HC_w \quad (3)$$

式中: P 表示污染物在水体表面大气中产生的平衡分压(Pa); C_w 代表污染物在洪涝灾害后水中的平衡浓度值(mol/m^3); H 为亨利常数($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$)。

亨利常数^[10]通常指污染物在气液平衡时的传递速度常数, 属于获取气液变化的最基础常数之一。下述公式为亨利常数常用表达式:

$$H' = C_a/C_w \quad (4)$$

式中: C_a 表示污染物在大气中的摩尔浓度值, H' 属于亨利常数的替换样式, 无量纲。

假设污染物属于微溶类型, 则亨利常数的预测表达式为:

$$H = V_p \cdot M_w/S_w \quad (5)$$

式中: V_p 表示饱和蒸汽压, M_w 代表污染物的分子量, S_w 为污染物在水中的溶解程度。

在污染物迁移过程中, 能够发生挥发损失, 其挥发表达式为:

$$m = \frac{Q_{air}(P_{ex} - P_m)}{RT} \times (M_w) \quad (6)$$

式中: Q_{air} 表示气体流量, P_{ex} 为污染物的逸出压, P_m 代表污染物的大气成分, R 属于气体常数, T 描述温度情况, M_w 表示污染物分子质量。

2 区域水环境中污染物迁移转化控制研究

2.1 污染物迁移的基本规律

洪涝灾害后区域水环境中污染物的迁移转化属于物理与化学及生物综合的过程^[11]。其中包括对流作用、分子扩散以及生物降解等过程。

(1) 对流作用

对流表示污染物随着水流以平均流速共同运动的过程, 水环境中任意一处的污染物在流向为 x 的对流通量计算公式是:

$$F_x = vC \quad (7)$$

式中: F_x 表示污染物的对流通量($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); v 代表 x 方向的平均流速(m/s); C 描述污染物浓度(mg/m^3)。

(2) 分子扩散作用

水环境中污染物因为分子产生的不规则运动, 由高浓度区域迁移到低浓度区的过程, 叫做分子扩散^[12]。即便在静止环境下, 也能发生迁移现象,

会造成污染物与水环境的分界面渐渐模糊不清,出现一个过渡带,随着时间的发展,形成弥散状况。分子扩散通量能够根据费克第一定理可知:

$$M_1 = -D_m \frac{\partial C}{\partial x} \quad (8)$$

式中: M_1 表示 x 方向上的分子扩散通量, D_m 表示扩散系数(m^2/s)。

(3) 弥散作用

此作用表示污染物进行对流计算时,为方便计算,利用平均流速与浓度为代表值时产生的。是污染物质点由于流速改变导致的相对于平均流速的离散行为,一般假设该过程属于不可逆过程。根据上述所述,纵向弥散作用产生的运输通量也可结合费克第一定律^[13]进行结算,表达式如下:

$$M_2 = -D_0 \frac{\partial C}{\partial x} \quad (9)$$

式中: M_2 代表 x 方向的弥散通量, D_m 表示弥散系数。

(4) 放射性衰变

水环境中一些放射性物质在迁移途中会随着时间的流逝而发生衰变,使其自身浓度降低^[14],衰减规律表达式如下:

$$C = C_0 \exp(-\lambda_0 t) \quad (10)$$

(5) 生物降解

洪涝灾害后,区域水环境中的污染物在微生物的影响下,逐渐降解成无机物^[15-17],重新组合成新的细胞物质,降低水中污染物浓度。在此过程中,污染物降解速度的快慢就是生化反应动力学问题,它们对污染物的预防与控制产生重要意义。

污染物浓度降解快慢能够表示为:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{v_m C}{K_c + C} \quad (11)$$

式中: X 表示 t 的浓度, K_c 属于常数。水体中污染浓度较低,即可表示为 C 远低于 K_c ,则上述表达式能转化为:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{v_m X_c}{K_c} \quad (12)$$

由于在较低的污染物浓度下微生物营养不够充分,生长速度较慢,即微生物的浓度也逐渐稳定, $v_m X/K_c = k_1$ 是一个常数,因此有:

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C \quad (13)$$

(6) 吸附滞留

污染物在水中迁移是因为水的流速以及污染物和介质之间离子交换、溶解沉淀和过滤等多种类型的物理化学作用所导致的。迁移路径和水的运动路径大概一致,迁移速度 v' 和水流速 v 之间存在下述关系:

$$v' = v/R_d \quad (14)$$

式中: R_d 表示为污染物在水中的滞留因子。

2.2 污染物迁移转化数学模型构建

根据上述分析,构建下述污染物在水环境中的迁移转化模型为:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda R_d C; \quad (15)$$

$$C(x, 0) = 0, x > 0;$$

$$C(0, t) = C_0, t > 0;$$

$$C(\infty, 0) = 0, t \geq 0.$$

对下述无量纲变量进行定义:

$$X = x/L, U = vL/D_0, \frac{T}{t} = \frac{\lambda}{\lambda^*} = \frac{K}{k} = \frac{D}{L^2 R_d}; D^* = D/D_0, \eta = D_m/D_0. \quad (16)$$

将式(16)带入到式(15)中,即可得到:

$$\frac{\partial C}{\partial T} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - U \frac{\partial C}{\partial X} - \lambda^* C. \quad (17)$$

假设 $C = C_1 \exp(-\lambda^* T)$, 再将式(17)带入到式(16)中,得出:

$$\frac{\partial C_1}{\partial T} = D^* \frac{\partial^2 C_1}{\partial X^2} - U \frac{\partial C_1}{\partial X}. \quad (18)$$

对下列参数进行定义:

$$\tau = \phi(T) = \int_0^T D^*(T') dT'; \quad (19)$$

$$\beta(T) = \int_0^T U(T') dT'. \quad (20)$$

将固定坐标转换为动坐标:

$$\xi = X - \beta(T). \quad (21)$$

将公式(18)转换为下述形式:

$$\frac{\partial C_1}{\partial T} = D^* \frac{\partial^2 C_1}{\partial \xi^2}. \quad (22)$$

通过上述变化之后,边界条件表示为:

$$C_1(\xi, 0) = 0, \xi > 0; \quad (23)$$

$$C_1(0, 0) = C_0; \quad (24)$$

$$C_1(\infty, \tau) = 0, \psi \geq 0. \quad (25)$$

只要确定随时间变换的水流速度 $U(T)$ 与污染物动力弥散系数 $D^*(T)$ 的函数表达式,即可获得污染物在时间与空间上的分布情况,也就是迁移模型^[18-20]。

3 实验结果与分析

为验证方法的有效性,以海南省三亚市水环境中的 PAHs 作为研究对象,筛选洪涝灾害后区域水环境中污染物迁移转化控制方案,验证筛选方案的科学合理性。

3.1 基于多目标组合的控制方案初选及优化

控制方案的初选规则:一是制定方案需要满足事先制定的最低标准,去掉不满足标准的方案;二是支配方案比被支配方案好时,去除支配方案。结合上述两个规则,经过方案的初步筛选得到控制方案,去除不符合要求与相互矛盾的方案,剩余的控制方案被称作优化集合,将确定的方案构成决策矩阵,最佳方案在这一集合中确定。

$$P = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \cdots & Y_{mn} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

上述矩阵中,不同目标之间存在可公度性,因此必须进行进一步优化,组成较为规范的决策矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

在优化后的矩阵中,在所有行与列中选择最佳和最差目标 X^* 与 X^- , 分别表示为理想解与非理想解:

$$X^* = (X_1^*, X_2^*, \cdots, X_n^*); \quad (28)$$

$$X^- = (X_1^-, X_2^-, \cdots, X_n^-). \quad (29)$$

获取不同方案和理想解、非理想解的差距:

$$S_i^* = \left| \sum (X_{ij} - X_j^*)^2 \right|^{1/2}; \quad (30)$$

$$S_i^- = \left| \sum (X_{ij} - X_j^-)^2 \right|^{1/2}. \quad (31)$$

因此, 组成两个列向量:

$$S^* = (S_1^*, S_2^*, \dots, S_m^*)^T; \quad (32)$$

$$S^- = (S_1^-, S_2^-, \dots, S_m^-)^T. \quad (33)$$

获取所有方案和理想解之间的接近度 R_i :

$$R_i = S_i^- / (S_i^* + S_i^-). \quad (34)$$

结合接近度的值来预测方案的优劣, 当获取结果在 0~1 之间时, X_i 与 X^- 重合, 表明方案最差; 当 X_i 与 X^* 重合时方案最佳。

3.2 方案确定

确定污染物迁移转化的原则主要有: 空间平等, 对污染物控制的成本、收益会出现空间不平等现象, 这样会降低地区之间共同控制污染物迁移转化的可能性, 加大综合控制难度; 环境质量, 它是人们开发控制的生态功能所具有的潜在能力, 源自于水环境的生态物理过程。

管理者能够在区域水环境管理规范内, 结合经济、社会与环境等方面现状, 权衡控制需求, 制定经济与社会发展的生态目标, 根据权重系数, 制定污染物迁移转化控制的方案。

通过方案的初选与优化确定出如下迁移转化控制方案:

方案一: 截污治污是关键, 针对河流的干流与支流做大规模截污治污处理, 控制向河网的污染物排放量。

方案二: 合理清淤河道, 必须在淤积情况严重影响水流时对其进行清理, 才能达到较好效果, 对控制迁移转化实现辅助作用。

结合拉格朗日乘数法则, 计算所选方案的污染物控制率, 其表达式如下:

$$\eta_i = \left[\frac{W_i}{K_3 K_4 Q_i^k} \right] \frac{1}{K_4 - 1}. \quad (35)$$

3.3 方案有效性验证

采用本文方案对洪涝灾害后三亚水环境中的污染物进行迁移转化控制, 对比原始污染物污染率, 能够得到污染物迁移控制对比结果, 如表 3 所示。分析表 3 可知, 在 4 次测试中, 水环境中的污染率范围为 45.7%~51.6%, 平均原始污染控制率为 48.2%, 而采用本文方案控制下的污染率范围为 8.95%~17.5%, 平均污染控制率为 11.5%。计算结果表明, 本文的控制方案能够有效控制洪涝灾害后区域水环境中的 PAHs 迁移转化, 污染率较低。

表 3 污染物迁移控制率

序号	原始污染率/%	本文方法控制下的污染率/%
1	45.7	10.3
2	51.6	17.5
3	48.1	9.06
4	47.5	8.95

4 结论

为有效控制洪涝灾害后水环境污染物的迁移转化, 减少生态环境污染, 本文以 PAHs 为例, 对洪涝灾害后区域水环境中污染物迁移转化控制进行研究。分析污染物主要来源, 探究吸附机理, 计算挥发损失; 研究污染物迁移的基本规律, 主要包括对流作用、分子扩散等, 确定迁移转化方程, 构建数学模型; 最后利用多目标组合法筛选

最佳控制方案, 计算控制率, 并通过实例进行验证。本文所选方案的平均污染控制率为 11.5%, 具有较好的迁移转化控制效果。

本文方案能够有效控制洪涝灾害后区域水环境中 PAHs 的迁移转化, 但 PAHs 是一大类污染物, 不同环数的 PAHs, 其性质各有差异; 同时三亚市地处热带, 常年温度高, 雨季雨量大。这些因素对于 PAHs 在不同介质中的迁移转化有明显的影 响, 因此控制方案在不同季节的控制效果仍有待改善, 下一步研究应对 PAHs 迁移控制的不同方案中能够影响的因素进行研究, 完善细化洪涝灾害后区域水环境中污染物迁移转化控制技术。

参考文献:

- [1] 孙凯, 李雅欣, 李舜尧, 等. 采用 HRMS 结合 ^{13}C -同位素比值技术探究水环境中新兴污染物的归趋和转化机制[J]. 环境化学, 2018, 37(6): 1223-1231.
- [2] 姚宏, 张士超, 刘明丽, 等. 基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评估[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 889-898.
- [3] AZIZ F, SYED J H, MALIK R N, et al. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Soan River, Pakistan: Insights into distribution, composition, sources and ecological risk assessment[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 109: 77-84.
- [4] 郑煌, 邢新丽, 顾延生, 等. 舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 513-519.
- [5] 许晓伟, 黄岁樑. 地表水中多环芳烃迁移转化研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(1): 26-33.
- [6] ZOE R, DEREK M, PAUL H, et al. Concentrations, trends, and air-water exchange of PAHs and PBDEs derived from passive samplers in Lake Superior in 2011[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(23): 13777-13786.
- [7] 聂明华, 刘慧慧, 熊小英, 等. 南昌市湖泊水体中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 1929-1938.
- [8] 汤铃, 张亮, 余乐安. 基于动态 CGE 模型的碳交易政策减排成本影响研究[J]. 系统科学与数学, 2019, 39(1): 51-64.
- [9] 侯泽宇, 王宇, 卢文喜. 地下水 DNAPLs 污染修复多相流模拟的替代模型[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2913-2920.
- [10] 谢五三, 宋阿伟, 田红. 中小河流域暴雨洪涝灾害风险评估及效果检验[J]. 气象科学, 2018, 38(2): 264-270.
- [11] 王晶, 薛联青, 张敏, 等. 不同降水频率下淮河流域洪涝灾害风险评估[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 1-5.
- [12] 李晨旭, 彭伟, 方振东, 等. 过渡金属氧化物非均相催化过硫酸氢盐(PMS)活化及氧化降解水中污染物的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(13): 2223-2229.
- [13] 李安定, 张彦, 周北海, 等. 城市景观河道中藻华暴发对水体中 DOM 特征的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 188-193.
- [14] 段云霞, 檀翠玲, 石岩, 等. 黑臭水体组合工艺治理技术研究及设计[J]. 水处理技术, 2018, 44(6): 134-137.
- [15] 王大钊, 王思梦, 黄昌. Sentinel-2 和 Landsat8 影像的四种常用水体指数地表水体提取对比[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 157-165.
- [16] 邹银洪, 张润宇, 陈敬安, 等. 黏土矿物在富营养化水体和底泥磷污染控制中的应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(6): 578-589.
- [17] 蒋祺, 郑伯红. 城市雨洪调蓄空间对洪涝灾害影响研究——以长沙市 2017 年洪涝灾害为例[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 31-40.
- [18] 王茜, 杨小柳, 徐超伟, 等. 基于土地利用的城市内涝交通风险评估[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 199-206.
- [19] 单慧娟, 彭三曦, 梁和成, 等. 多次饱水地下水化学作用对岸土体的微结构效应研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 39-46.
- [20] 高超, 张正涛, 刘青, 等. 承灾体脆弱性评估指标的最优格网化方法——以淮河干流区暴雨洪涝灾害为例[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 119-129.

(下转第 36 页)

- [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