

基于 Visual Modflow 的重庆某工业园区地下水污染物运移模拟*

饶磊¹, 魏兴萍¹, 刘迅²

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331;

2. 重庆南开中学, 重庆 400030)

摘要:【目的】预测重庆市江津区某工业园地下水污染情况,模拟主要污染物在地下水中的运移过程和分布特征。【方法】通过对研究区进行水文地质调查和查阅文献资料得到相关参数,利用 Visual Modflow 数值模拟软件建立地下水流概念模型,以化学需氧量(COD)和氨氮质量浓度做为污染物运移模拟研究的主要指标,对污水处理站发生泄漏后进入地下水中的主要污染物进行溶质运移模拟。【结果】在非正常状况下,污水处理站地下排污管道破裂导致废水持续下渗,污染羽沿水流方向扩散,COD和氨氮质量浓度在此过程中缓慢增加,第7300天时污染物影响范围和迁移距离达到最大,向东南方向迁移最远距离均达到808 m。【结论】模拟结果显示第7300天时污染物影响范围已超出园区并进入长江,为防止污染物对当地生态环境造成威胁,需及时发现问题并采取控制措施。

关键词:数值模拟;溶质运移;地下水污染;Visual Modflow;重庆

中图分类号:X824;X523

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2018)05-0072-07

三峡库区是一个非常特殊的生态功能区,同时也是一个典型的生态系统脆弱区。由于当前该区域内众多不同大小工业园区的生产运行和污染物排放,库区内的生态环境问题因而变得日益突出^[1],其中工业废水的不合理排放及非正常泄漏都威胁到当地的地下水生态环境和主要受纳水体的水质。目前国内外学者利用 Visual Modflow 软件对地下水污染问题进行研究的案例不少,如:沈婷婷^[2]将该软件应用到上海某化工厂地下水溶质运移中,讨论了污染物对地下水环境的影响;王钰等人^[3]以甘肃省合作市某尾矿库库区作为研究区,运用 Visual Modflow 软件模拟了氨氮等特征污染物在地下水的运移情况;徐凤^[4]利用 Visual Modflow 对西南岩溶区某项目地下水污染进行了模拟;Saghravani 等人^[5]利用该软件对承压水含水层的特征污染物进行了运移模拟。本研究以重庆市江津区某工业园区为研究区域,深入分析了区域内水文地质边界条件和含水层补径排条件,并合理刻画地下水动态情况,然后利用 Visual Modflow 数值模拟软件对这一典型县区工业园的地下水污染物迁移规律和分布特征进行了研究。本研究对于对指导园区污染合理排放和生态环境防治具有重要的理论意义和现实意义^[1],同时也为当地和类似水文地质条件下的地下水环境质量监测、开发利用恢复、风险预防预测及管理的相关实践提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于重庆市江津区,地理坐标为北纬 28°28′~29°28′,东经 105°49′~106°38′。江津区位于长江中上游,三峡库区尾端,地处四川盆地东南边缘,跨盆地东平行岭谷、盆南丘陵和盆周地共 3 个地貌类型区。江津区气候属亚热带季风气候区,区内年平均气温 18.4℃,年日照时数 1 273.6 h,年均降水量 1 030 mm,全年降水主要集中在 5—8 月^[6]。研究区周边最近的地表水体为东南侧约 800 m 处的长江,在江津区的羊石镇入境,西出珞璜镇的石家沟口进入重庆市区,朱沱水文站以上的长江流域面积为 697 925 km²。长江流经江津城区段的常年洪水位为 185 m 左右,现场水位调查时段监测水位为 197 m,而流经研究区内的平溪河在本研究监测时段中的水位达到 235 m。

* 收稿日期:2017-08-26 修回日期:2018-03-22 网络出版时间:2018-09-26 13:26

资助项目:国家自然科学基金青年项目(No. 41202135);重庆市科学技术委员会基础科学与前沿技术研究项目(No. cstc2016jcyjA0150)

第一作者简介:饶磊,男,研究方向为资源环境与景观生态,E-mail:1603860846@qq.com;通信作者:魏兴萍,女,教授,博士,E-mail:xingpingwei@126.com

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180926.1325.034.html

研究区内的地势起伏大。最高点位于西侧花果山,海拔高度为 493.2 m;最低点位于南侧平溪河入江口,海拔高度为 216.7 m;两点相对高差为 276.5 m。地形由南北走向的单斜低山、丘陵构成,西靠花果山背斜低山而东临长江,地势总体呈西北高东南低。研究区内主要出露基岩为三叠系上统须家河组(T_3xj)、侏罗系中下统自流井组($J_{1-2}z$)、中统上沙溪庙组(J_2s)、下沙溪庙组(J_2xs)、上统蓬莱镇组(J_3p)及中统遂宁组(J_2sn)的砂岩及泥岩,此外还有零星、分散的第四系人工填土层、残坡积层和长江冲积层土层,如封二彩图 1 所示。

2 研究方法

研究所用的 Visual Modflow 数值模拟软件是由加拿大 Waterloo 水文地质公司在美国地质调查局(USGS)研发的 Modflow 的基础上,集成开发研制的先进的地下水渗流和溶质运移的标准可视化专业模拟软件^[7],现已广泛地被应用于地下水环境不同污染物运移模拟及预测^[8]和地下水水流场变化分析预测。

研究区地下水动力数学模型以水文地质概念模型为基础,根据实际水文地质边界条件、地下水流特征和各渗透要素在水文地质环境下的变化。此模拟区地下水可概化为非均质各向同性、非稳定、空间三维结构的地下水水流模型^[9]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + W = S \frac{\partial H}{\partial t}, (x, y, z) \in \Omega, t > 0,$$

$$H(x, y, z, t)|_{t=0} = H_0(x, y, z), t \geq 0, K \frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma} = q(x, y, z, t), (x, y) \in \Gamma_2, t \geq 0.$$

式中: K_x 、 K_y 、 K_z 是在 x 、 y 和 z 方向上的渗透系数分量,单位: $m \cdot d^{-1}$; H 为水位标高,单位: m ; W 为单位体积流量,代表流入或排泄流量,单位: $m^3 \cdot s^{-1}$; S 为含水介质的贮水率; H_0 为初始水位,单位: m ; Γ_2 为二类边界; K 为三维空间上的渗透系数张量; n 为 Γ_2 边界的外法线方向; $q(x, y, z, t)$ 为二类边界上已知流量函数; Ω 为研究区。

3 建立模型

3.1 含水层及边界模型概化

3.1.1 水文地质条件 研究区内虽存在多种地下水类型,并相互重叠,但以基岩风化带网状裂隙水分布最广,与人类活动关系最为密切。根据水文地质单元划分原则,以地表分水岭划界,将研究区划分为平溪河、兰家沱和河边沟共 3 个水文地质单元。此次模拟发生渗漏的污水处理厂位于兰家沱水文地质单元,处于侏罗系上统沙溪庙组(J_2s)地层,距离长江最近约 800 m。污水处理厂位置及研究区地层岩性结构如图 2 和图 3 所示。

平溪河水文地质单元分布在工业园区西部,单元内自西向东分布着三叠系上统须家河组(T_3xj)、侏罗系中下统自流井组($J_{1-2}z$)、中统下沙溪庙组(J_2xs)和上沙溪庙组(J_2s)砂岩泥岩互层组合的碎屑岩层,岩层产状 $110^\circ \angle 15^\circ \sim 30^\circ$ 。平溪河水文地质单元内赋存的地下水类型为碎屑岩裂隙孔隙水和基岩风化带网状裂隙水。

河边沟水文地质单元分布在工业园区东北部,主要为上沙溪庙组地层,该岩性为多层泥岩夹砂岩互层,顶部为泥岩,岩层产状 $110^\circ \angle 20^\circ \sim 25^\circ$ 。地貌受地质构造和岩性控制,发育为北北东走向单斜高丘陵,丘体多层砂岩保护,使丘脊宽缓呈台梯状。沟谷深切 100~150 m,河边沟支流沿泥岩露头发育,走向北北东,主干横切构造,流向由西向东,在德感坝注入长江。

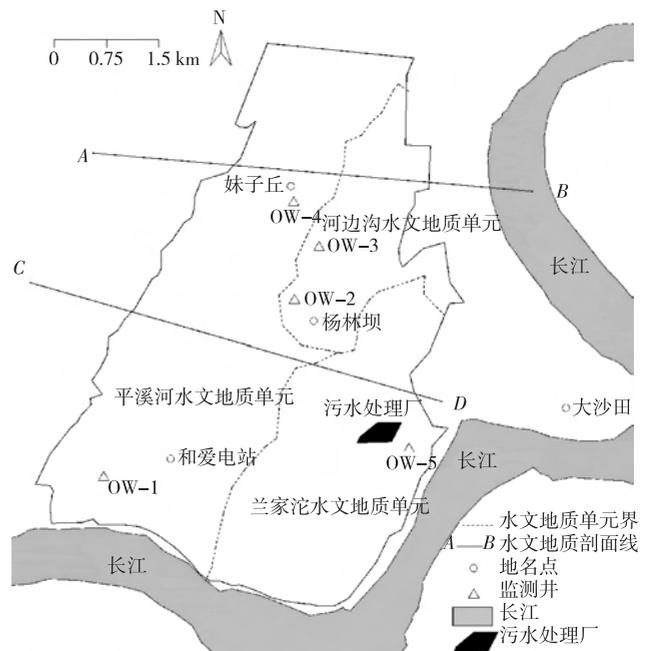


图 2 研究区水文地质单元示意图

Fig. 2 hydrogeological map of the study area

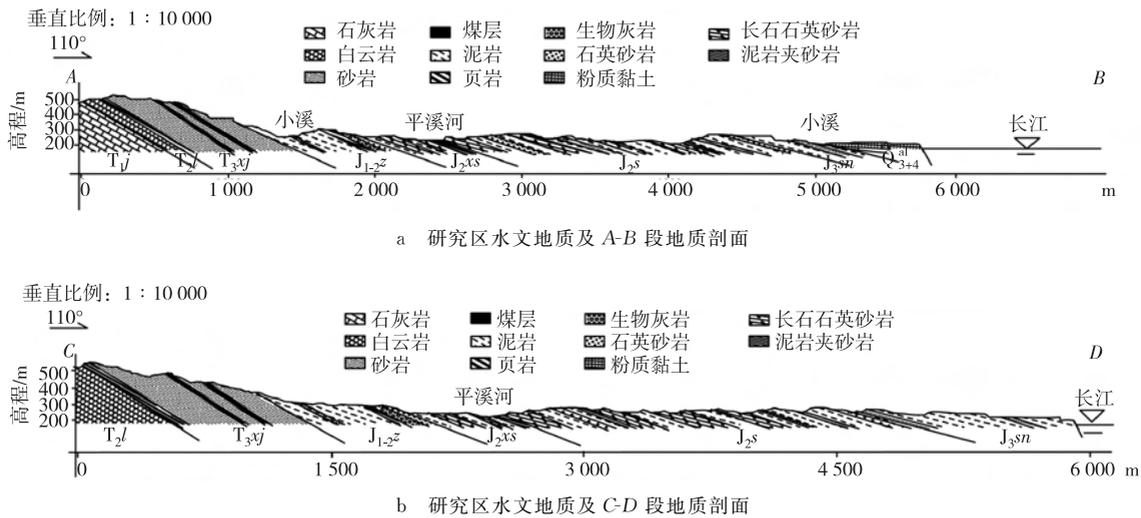


图 3 研究区水文地质 A-B 及 C-D 段剖面

Fig. 3 Hydrogeological A-B and C-D profiles in the study area

兰家沱水文地质单元分布在园区东南部,地形西高东低,西部为高丘,基岩由侏罗系上统沙溪庙组(J_2s)构成,岩层产状 $110^\circ \angle 20^\circ \sim 25^\circ$,其地下水水文地质特征与河边沟水文地质单元相似。

3.1.2 含水层概化及补、径、排条件 依据现场调查、查阅水文地质调查报告及地质勘察报告等方式而收集到的地层岩性、含水介质、赋存条件及地形地势等资料,将研究区浅层含水层概化为上下两层,含水层地下水的类型大体上划分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙孔隙水和基岩网状风化裂隙水共 3 种地下水类型:1) 在德感坝长江一级堆积阶地底部推移质粉砂、砂砾石层中富存松散岩类孔隙潜水,存有统一的潜水面,并与河水互补,上方覆有超过 30 m 厚的悬移质黄色砂质粘土层,隔断了地表水与地下水之间的联系。2) 基岩裂隙水主要赋存于侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s)砂岩裂隙中,主要接受大气降水补给,存于砂岩层中;每个含水砂岩体均被弱透水泥岩所隔,从而使每个含水层构成了独立的含水单元,各自形成补、径、排系统。3) 基岩网状风化裂隙水主要赋存于泥岩、粉砂岩为主,偶夹细砂岩层侏罗系遂宁组(J_2sn)中,也存在园区内侏罗系上沙溪庙组(J_2s)地表风化带中;大气降水是主要补给来源,补给区的范围与各含水岩组的出露范围一致,大气降水和地表水通过岩层露头孔隙、裂隙下渗,随地形由高向低处运移,因园区丘陵起伏、地形破碎、径流途径短,具有就近补排等特点。

3.1.3 边界条件特征 根据水文地质单元条件,研究区北部受地形地质控制除受大气补给外,几乎不与区外进行流量交换^[10];地下水流主要以自西向东的水平方向流动为主。研究区降水量和蒸发量相差较小,大气降水是含水层主要补给来源,其他补给项相对较小,故将整个区域的补给项概化为统一大气降水补给^[11-12]。天然资源补给量采用降雨入渗系数和降雨量来计算,补给区的范围与各含水岩组的出露范围一致。研究区东部南部地势较西北部低,大气降水补给因地形破碎不易蓄存,大部分汇入溪流冲沟,少许以潜水形式下渗,最终均排入长江,故将东部南部概化为河流排泄边界。研究区西面露地层为三叠系须家河组,大气降水顺地层倾向流动,受阻后再向长江方向运动,为地表分水岭西部边界,大部分水流方向直接由西北至东南排泄至长江,所以西部为零通量隔水边界,研究区底部基岩弱透水性岩层广泛分布,模型中将底部概化为隔水底板^[13]。

3.2 建立地下水流模型

3.2.1 模拟情景源强设定 研究区地下水的补给主要来自大气降雨,从该工业园区产业结构来看,区域内水污染物排放的种类较多,但实际生产废水排放量较少,主要以生活污水为主。正常情况下污水处理厂废水通过管道输送,且废水池、管道等经过防渗处理,不易泄漏。本次模拟设定情景是在非正常状况下,污水处理站废水池地下排污管道破裂导致废水污染物下渗,将会有废水渗入地下或者沿地表径流汇入长江,其中渗入地下的污染物以潜流形式随着地下水向低处进行流动,这些都将直接或间接影响地下水水质及长江水质。根据污水处理厂的设计资料可知,排污管道为钢筋混凝土构造,管道长约 0.8 km,管径 800 mm。《建筑给水排水管道工程施工及验收规范(GB50368—2008)》中允许此排水管道正常渗水量为 $3.96 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$;非正常状况下渗水量则根据管道破裂程度以正常渗水量 10 倍计算,得到模拟渗水量为 $45.62 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。由于地下水在含水层中对流受到地质条件的影响,具体流动过程较为复杂,所以此次模拟主要分析地下水污染物向下游流动时的对流及弥散

作用,暂时不考虑它在含水层中流动时受到具体的吸附、挥发、生物化学反应等影响。

依据上所述水文地质条件,利用 Visual Modflow 软件建立地下水流模型^[4],本研究采用常用的有限差分法将研究区域水平表面划分两层多个单元网格^[10],此次模拟区平面面积合计 29.518 km²,矩形划分为东西向长度 8.4 km,共 84 列;南北向长度为 8.3 km,共 83 行的矩形网格,一层共计划分网格 84×83 个,其中有效网格 2 952 个,单个单元网格为 100 m×100 m,其余网格为无效网格^[14-15],研究区表层网格划分如封二彩图 4 所示。

3.2.2 水流模型参数 模型采用的各项参数引用《綦江水文地质勘察报告》^[16]和江津区相邻区域水文地质参数,重力给水度及水力坡度等选取经验值,具体取值如表 1 所示,且有关参数在模型建立时经过适当修正。

表 1 主要水文地质参数

Tab. 1 Major hydrogeological parameters

| 参数名称 | 参数取值 | 备注 | 参数名称 | 参数取值 | 备注 |
|------------------------------------|------|------|--------------------------------|-----------------------|-----|
| 侏罗系遂宁组渗透系数 $K_1/(m \cdot d^{-1})$ | 2.54 | 实测值 | 隔水层渗透系数 $K_0/(m \cdot s^{-1})$ | 1.00×10^{-8} | 经验值 |
| 侏罗系沙溪庙组渗透系数 $K_2/(m \cdot d^{-1})$ | 1.42 | 实测值 | 水力坡度 I | 0.005 | 经验值 |
| 潜水含水层厚度 h/m | 19 | 勘察报告 | 给水度 μ | 0.21 | 经验值 |

3.2.3 模型的识别与验证 对地下水数值模拟的模型识别一般是识别含水岩层渗透系数、给水度等参数,通过反复调整数据和重复软件运行等操作来对比验证地下水流场、动态以及相关水文地质条件是否与实际情况相符合^[17]。而本研究中模型的参数识别与检验过程采用试估校正法,该方法属于反求参数的间接方法之一^[17]。在地下水流场模拟过程中,采用了现有民井调查和工业园水质监测井资料,得到监测点高程、地下水位等信息,为模拟地下水流场分布的准确性提供依据,监测点具体信息如表 2 所示。

表 2 监测点信息

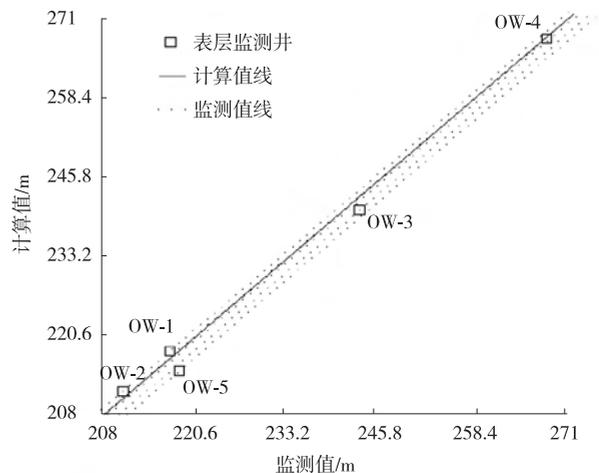
Tab. 2 Monitoring point information table

| 监测点类型 | 编号 | 经度 | 纬度 | 高程/m | 埋深/m |
|--------|------|---------------|--------------|------|------|
| 工业园监测井 | OW-1 | 东经 106°11'06" | 北纬 29°14'15" | 220 | 2.5 |
| 民用井 | OW-2 | 东经 106°12'08" | 北纬 29°15'11" | 223 | 14.0 |
| 民用井 | OW-3 | 东经 106°12'23" | 北纬 29°15'42" | 255 | 12.5 |
| 民用井 | OW-4 | 东经 106°12'20" | 北纬 29°15'45" | 272 | 3.0 |
| 工业用监测井 | OW-5 | 东经 106°13'07" | 北纬 29°14'41" | 225 | 2.4 |

图 5 显示了监测井监测水位与模型计算水位的拟合结果。由于前期现场调查和资料收集较为准确,模型地下水流场及监测井监测水位和模型计算水位基本一致,其中 1,2,3 号井中水位监测值与计算值的误差均在 1 m 以内;4 号井监测值与计算值误差也在 2 m 以内;5 号监测井监测值误差为 3.6 m。本研究选择的 5 口监测井平均绝对误差 0.87 m,基本符合模拟的精度要求。

3.3 溶质运移模型

3.3.1 地下水溶质运移数学模型 由于污水处理厂的最终接纳水体主要是长江,属于大型河流,且根据地势地貌和水文地质环境,此处污染物渗漏后在水平方向上主要向下游即靠近长江方向迁移扩散,本研究应用 Visual Modflow 中的 MT3DMS 模块对溶质运移模型进行模拟。故选取以下微分方程对地下水溶质运移进行描述^[18]:



注:最大误差为 5 号井的 -3.6 m,最小误差为 4 号井的 -0.028 m,平均绝对误差 -0.87 m,归一化均方根为 3.38%

图 5 监测井监测水位与模拟水位拟合结果

Fig. 5 Fitting results of observation log water level and simulated water level

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s + \sum R_n,$$

$$C(x, y, z, t)|_{t=0} = 0, (x, y, z) \in \Omega, t = 0, C(x, y, z, t)|_{\Gamma} = 0, (x, y, z) \in \Omega, t > 0.$$

式中: θ 是介质孔隙度; C 表示溶质的质量浓度, 单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; t 为时间; X_i 或 X_j 表示在直角坐标系下沿各方向上的距离; D_{ij} 表示水动力弥散系数张量; v_i 表示渗流速度; q_s 表示单位体积含水层流入或排泄的流量, C_s 表示源汇项的质量浓度, $\sum R_n$ 表示化学反应项, Ω 为研究区。

3.3.2 地下水污染物及其参数确定 在实地调查园区水质和分析园区产业构成的基础上, 笔者发现此处水污染物排放的种类较多, 主要以生活生产污水为主, 工业废水中主要污染物有 10 余种, 主要包括水中悬浮物、氨氮、泥沙、石油类污染物等常见工业园区地下水污染物。一般而言, 选取其中存在的 1 到 2 种最为明显的主要污染物^[18], 并对它们进行迁移过程和浓度变化监测和模拟, 得出的结果更科学合理。但考虑到本研究区域的工业结构、规划生产类型以及排放进入污水处理厂的工业废水污染物对周边地下水环境影响的程度, 笔者选择了化学需氧量(COD)和氨氮质量浓度做为污染物运移模拟研究的主要指标。其中, COD 作为衡量水体中有机物含量的重要指标, 代表了水体受有机污染的程度; 氨氮则是限制污染排放政策文件中例如工业废水和生活废水排放的约束性指标。选取这两个指标进行污染物运移模拟能够展示园区地下水受污染后的污染程度随时间推移的变化情况。根据园区水质资料, 并依据污水处理厂进水水质分析, 确定了上述指标的初始值等参数, 具体参数见表 3。其中: 氨氮质量浓度超标标准限值参照《地下水环境质量标准 GB/T14848—93》Ⅲ类标准评价, 即 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; COD 参照《地表水环境质量标准 GB3838—2002》中Ⅲ类标准评价, 即 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。利用 Visual Modflow 软件的 MT3DMS 模块对非正常情况下潜水含水层中 COD 和氨氮质量浓度时空变化过程进行模拟预测^[19], 在不考虑污染物在地下水随时间推移被吸附、过滤和扩散降解等情况下, 分析污染物向污水处理厂南侧下游的迁移最远距离、浓度变化情况以及影响范围。

表 3 主要研究指标

Tab. 3 Main indice in the study

| 研究 指标 | 污染物 泄漏状态 | 污染物泄漏量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | 污染物纵向弥散 系数/($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$) | 地下水流 速度/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$) | 初始值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) |
|----------|-------------|---|--|---|---|
| COD | 持续 | 45.62 | 0.5 | 0.012 7 | 500 |
| 氨氮 | 持续 | 45.62 | 0.5 | 0.012 7 | 35 |

4 模拟结果分析

将初始条件、含水层参数及边界条件等代入地下水溶质模型^[10], 利用 Visual Modflow 软件, 结合运行水流和溶质模型地下水污染物运移过程, 得到非正常情况下主要污染物的 COD 以及氨氮质量浓度分别在第 730 天, 第 3 650 天及第 7 300 天时, 在浅层含水层中的分布特征如封二彩图 6 所示。

封二彩图 6 显示, 污染源呈点状持续泄漏污染, 在此情景下模拟可知持续泄漏后 7 300 天内污染面积将随时间推移不断增加, 污染晕中心及污染羽中 COD 和氨氮质量浓度呈缓慢升高趋势。预测时段为第 730 天时, 污染晕中心区域的 COD 与氨氮质量浓度分别为 73.65 和 $5.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 第 3 650 天时, 污染晕中心的 COD 与氨氮质量浓度分别为 103.21 和 $7.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 第 7 300 天时, 污染晕中心的 COD 与氨氮质量浓度分别为 104.05 和 $7.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 且污染物中心的 COD 与氨氮质量浓度增加速率呈现出随时间推移逐渐变小的特征。泄漏发生第 730 天, 第 3 650 天和第 7 300 天时, 污染羽向下游东南方向迁移到达最远距离分别为 235, 552 和 808 m 处, 影响范围分别达到 $0.17, 0.54$ 和 0.97 km^2 。其中, COD 在各预测时段达到标准限值 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的超标距离在各时段分别为 63, 165 和 259 m 处, 氨氮质量浓度在各预测时段达到标准限值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的超标距离在各时段分别为 84, 210 和 323 m 处。相比较而言, 氨氮质量浓度在各预测时段的超标距离均大于 COD 的超标距离。由封二彩图 6 可知, 此情景下污染物呈现先向四周扩散, 然后主要向东南扩散的趋势。当预测年份为第 7 300 天时, 污染物的迁移距离和影响范围均达到最大, 此时迁移距离和影响范围在东南方向已超出园区范围并进入长江。

5 结论与讨论

本研究以重庆市江津区某工业园为研究区, 深入分析当地地质地貌和水文地质条件, 利用 Visual Modflow 数值软件建立研究区地下水流概念模型。并根据实地勘察地下水位和地下水流动特征对概念模型进行识别和

验证。在模型构建达到精度要求的情况下,设计非正常状况下由于污水处理厂管道破损发生泄漏,污染物随着废水渗入地下水含水层中,以 COD 和氨氮质量浓度做为污染物运移模拟研究的主要指标,将地下水水流数值模拟同溶质迁移模拟进行了耦合,以分析此种情景设计下的地下水受污染情况。

模拟结果显示,污染物主要沿着地下水流方向扩散,先向四周缓慢扩散,而后主要向东南方向运移,在设计预测时段内污染物的最大影响范围都达到了 0.97 km^2 。预测第 730 天、第 3 650 天和第 7 300 天时氨氮质量浓度的超标距离均大于 COD 超标距离,且污染物在第 7 300 天时最大运移距离(808 m)明显已经能够超过到达长江的距离——虽然此时污染物进入长江水体中的剂量微小,仍低于标准限值,且江水对污染物还有进一步的稀释作用,但随着时间推移,污染物将不断迁移进入长江,最终仍然会影响到长江的水生态环境。

地下水的环境情况较为复杂,污水处理厂的污染物质泄漏在早期阶段也不易被察觉,而且随着时间的推移,污染物迁移速度比较缓慢,污染影响面积也呈现缓慢扩大且不易准确划定范围。然而,地下水一旦被污染就难以修复,治理工作也比较困难。因此,对于建立在三峡库区这样一个生态系统脆弱的区域里的工业园区而言,对它们进行以预防和修复治理为目的的地下水污染物数值模拟预测具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 李月臣,刘春霞,汪洋,等. 三峡库区(重庆段)生态环境综合研究[M]. 北京:科学出版社,2015.
LI Y C, LIU C X, WANG Y, et al. Comprehensive study on the ecological environment of the Three Gorges reservoir area (Chongqing section)[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [2] 沈婷婷. 某化工厂场地地下水溶质运移模拟研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S1): 378-382.
SHEN T T. Numerical simulation of solute transport in groundwater at a chemical plant[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(S1): 378-382.
- [3] 王钰,强怡星,杨海瑞. 基于 Visual MODFLOW 的某尾矿库地下水污染模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 95-99.
WANG Y, QIANG Y X, YANG H R. Numerical simulation of groundwater pollution in a tailing pond based on Visual MODFLOW[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(5): 95-99.
- [4] 徐凤. 基于 Visual MODFLOW 的西南岩溶区某项目地下水污染运移模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.
XU F. Study of groundwater contamination transport simulation on a project in southwest karst area based on Visual MODFLOW [D]. HeFei: Hefei University of Technology, 2014.
- [5] SAGHRAVANI S R, MUSTAPHA S, IBRAHIM S, et al. Simulation of phosphorus movement in unconfined aquifer by means of visual MODFLOW[J]. Journal of Computer Science, 2010, 6(4): 446-449.
- [6] 孙龙,张洪江,程金花,等. 重庆江津区柑橘地土壤大孔隙特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 194-198.
SUN L, ZHANG H J, CHENG J H, et al. Soil Macropore characteristics under citrus land in Jiangjin city, Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 23(3): 194-198.
- [7] 王庆永,贾忠华,刘晓峰,等. Visual MODFLOW 及其在地下水模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(5): 90-92.
WANG Y Q, JIA Z H, LIU X F, et al. Visual MODFLOW and its application to groundwater simulation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2007, 18(5): 90-92.
- [8] 马志飞,安达,姜永海,等. 某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟[J]. 环境科学, 2011, 33(1): 64-70.
MA Z F, AN D, JIANG Y H, et al. Simulation on contamination forecast and control of groundwater in a certain hazardous waste landfill[J]. Environmental Science, 2011, 33(1): 64-70.
- [9] 严冬冬. 盘山县某化工园区非正常工况下地下水污染预测与防治[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2015.
YAN D D. The groundwater pollution and prevention under abnormal of an industrial park in Panshan county[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.
- [10] 赵贝,刘建军. 基于 Visual Modflow 地下水污染物溶质运移的模拟[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2015, 33(6): 787-792.
ZHAO B, LIU J J. Simulation of groundwater polluted contamination migration based on Visual Modflow [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2015, 33(6): 787-792.
- [11] 尉鹏翔. Visual Modflow 在地下水污染物运移模拟中的应用[J]. 水资源保护, 2011, 27(4): 19-21
WEI P X. Application of Visual Modflow to simulation of groundwater contamination migration [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(4): 19-21.
- [12] 梁军平,杜鹏飞,李云桢. 基于 Visual Modflow 的地下水流场变化预测研究[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 267-304.
LIANG J P, DU P F, LI Y Z. Study on protection of change in groundwater flow field based on Visual Modflow[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(S1): 267-304.
- [13] 高小文,吕敬,李秀娟,等. 铜矿尾矿库污染物在地下水中

- 运移规律数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2):120-125.
- GAO X W, Lü J, LI X J, et al. Numerical simulation of contaminant transport characteristics in groundwater of copper mine tailings[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(2):120-125.
- [14] 焦芳芳, 马振民, 侯玉松. 焦作地区浅层地下水铬(VI)污染机理及迁移预测[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(2):82-87.
- JIAO F F, MA Z M, HOU Y S. Pollution mechanism and migration prediction of Cr (VI) in shallow groundwater in Jiaozuo area[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(2):82-87.
- [15] 王建红, 余启明, 杨俊仓. 基于 Arcgis 和 Visual MdfLOW 的黑河流域中游平原区地下水水流数值模拟与预测[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(1):80-87.
- WANG J H, YU Q M, YANG J C. Numerical Simulation and forecast of groundwater in the Middle Plains of Heihe river basin based on ArcGIS and Visual MODFLOW[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(1):80-87.
- [16] 四川地质局. 区域地质调查报告(綦江幅)[R]. 四川:四川地质局, 1975.
- Sichuan Geology Bureau. Regional geological survey report (Qijiang)[R]. Sichuan: Sichuan Geology Bureau, 1975.
- [17] 黄一帆, 刘俊民, 姜鹏, 等. 基于 Modflow 的泾惠渠地下水动态及预测研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2):273-278.
- HANG Y F, LIU J M, JIANG P, et al. Research for groundwater dynamic and forecasting of Jinghui irrigation zone based on Modflow[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(2):273-278.
- [18] 李霄, 都基众, 崔健, 等. 浑河扇地典型区域地下水有机污染物运移与预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7):2530-2537.
- LI X, DU J Z, CUI J, et al. Migration and prediction of groundwater organic contamination in typical region of Hunhe river alluvial fan[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7):2530-2537.
- [19] 王帅兵, 张雪蕾, 李常斌, 等. 基于 Visual MODFLOW 的武威盆地地下水动态模拟及预测[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(2):159-165.
- WANG S B, ZHANG X L, LI C B, et al. Simulation and forecasting of groundwater system dynamics in the Wuwei basin based on Visual MODFLOW application[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, 51(2):159-165.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Numerical Simulation of Groundwater Pollutants Transport in an Industrial Park of Chongqing Based on Visual Modflow

RAO Lei¹, WEI Xingping¹, LIU Xun²

(1. Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area,

College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;

2. Chongqing Nankai Middle School, Chongqing 400030, China)

Abstract: [Purposes] Predict groundwater pollution situation in an industrial park of Jiangjin, Chongqing, and simulate the migration process and distribution characteristics of main pollutants in groundwater. [Methods] The relevant parameters were obtained through hydrogeological survey and literature review in the study area. Using the Visual Modflow numerical simulation software to establish the concept model of the groundwater flow. The chemical oxygen demand (COD) and ammonia nitrogen (NH₃-N) mass concentration were taken as the main indexes of pollutant transport simulation to carry out solute transport simulation of main pollutants entering groundwater after sewage treatment Station leakage. [Findings] In abnormal conditions, sewage treatment station underground sewage pipe rupture resulted in continuous infiltration of wastewater, pollution plume spread along the flow direction, COD and mass concentration of NH₃-N in this process slowly increased, on the 7 300th day, the influence range and transport distance of pollutants reached the maximum, and the furthest distance to southeast direction reached 808 m. [Conclusions] The simulation results show that the scope of the pollutants has exceeded the park and entered the Yangtze river on the 7 300th day. In order to prevent its threat to the local ecological environment, it is necessary to find out the problems and take control measures in time.

Keywords: numerical simulation; solute transport; groundwater pollution; Visual Modflow; Chongqing

(责任编辑 方 兴)

(接正文36页)

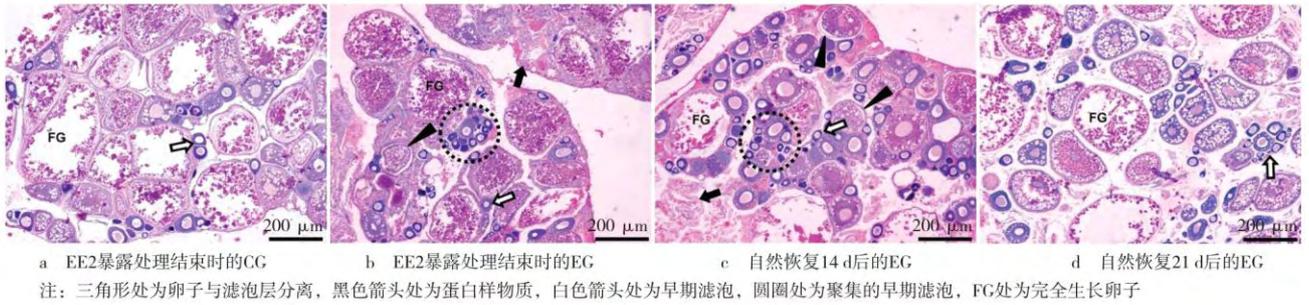


图2 斑马鱼雌性成鱼的卵巢结构

Fig. 2 Ovarian structure of zebrafish female adults

(接正文73~76页)

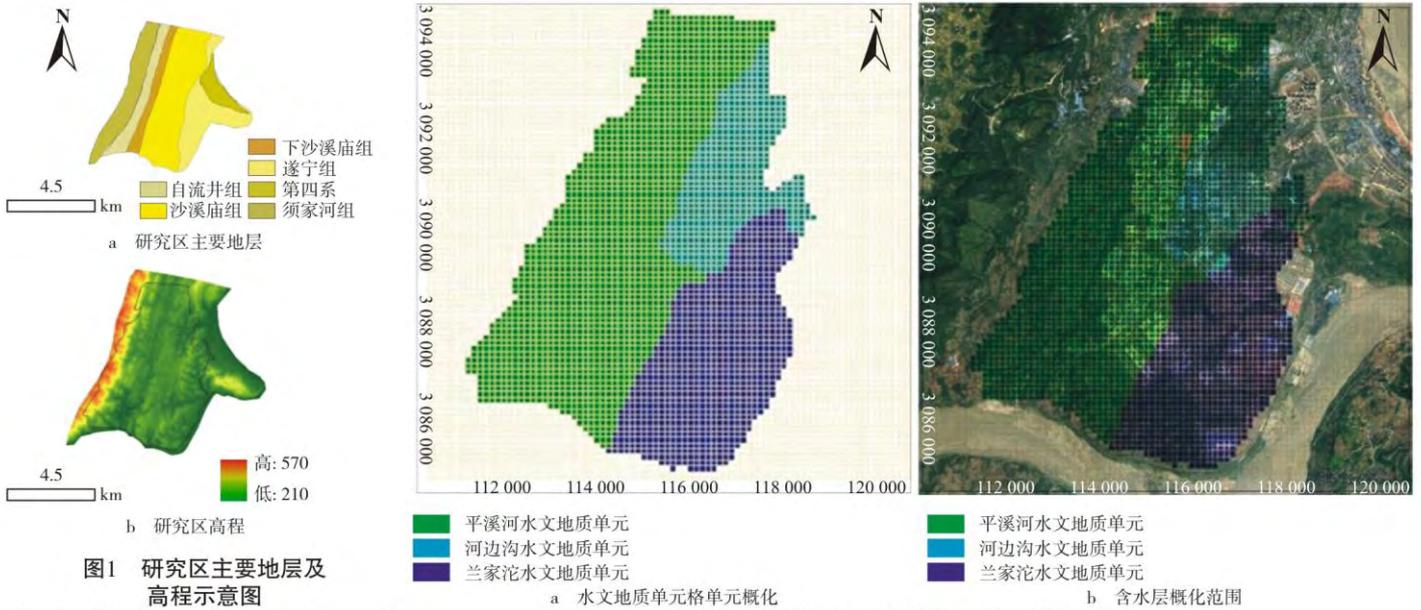


图1 研究区主要地层及高程示意图

Fig. 1 Sketch map of the main strata and elevation of the study area

图4 研究区水文地质单元分区概化示意图

Fig. 4 Sketch map of hydrogeological unit zoning in study area

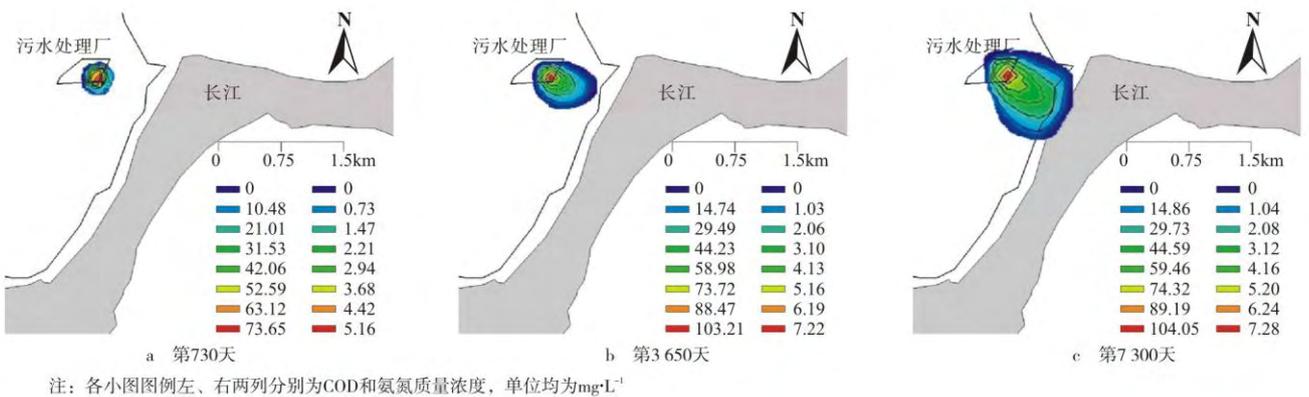


图6 污染物运移平面图

Fig. 6 The pollutant transport plan

(接正文117~118页)



图1 活体半叶枯斑法实验结果

Fig. 1 Results of *in vivo* half-leaf method



注: 左半叶为对照, 右半叶为施药处理

图2 馏分Fr6离体半叶枯斑法活性结果

Fig. 2 Results of *in vitro* half-leaf method of fraction Fr6