

基于GMS的云南德厚水库下游废弃砒霜厂 地下水溶质运移模拟

李华¹, 吴静¹, 徐世光^{1,2}, 徐梓矿³

(1. 昆明理工大学, 昆明 650093; 2. 云南地矿工程勘察集团公司, 昆明 650011; 3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 地下水溶质运移模拟是找出污染物迁移规律、确定污染范围及污染物浓度分布的重要手段, 可以为合理开发地下水资源、优化设计地下水开采方案及地下水污染修复提供定量依据。在分析德厚水库咪哩河流域裂隙岩含水层的水力性质和污染物运移特征的基础上, 运用GMS软件建立地下水流场模型和溶质运移模型, 对裂隙岩潜水的流场和污染物进行了数值研究, 判断出了污染源分布及污染羽扩展范围, 分析了砒霜厂污染物运移对水库建设的影响。

关键词: GMS; 溶质运移; 地下水污染; 数值模拟; 德厚水库

中图分类号: S273.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)02-0209-04

Simulation of solute transport of groundwater at abandoned arsenic factory in downstream of Dehou reservoir in Yunnan based on GMS

LI Hua¹, WU Jing¹, XU Shiguang^{1,2}, XU Zikuang³

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yunnan Bureau of Geology and Mineral, Kunming 650011, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The solute transport model of groundwater is an important way to identify the contamination transfer rule and define the scope of pollution and the concentration distribution. It can provide the quantitative base for the reasonable exploitation of groundwater resources and the optimization design of groundwater exploitation program and the pollution remediation of groundwater. Based on the analysis of karst-fractured aquifer hydraulic properties and characteristics of pollutant migration in Mili river basin of Dehou reservoir, the paper used GMS software to establish the groundwater flow field and solute transport model. A numerical study for flow field and pollutants of karst-fractured water was made. It judged the distribution of pollution source and pollution plume extended range and analyzed the effect of pollutant migration on reservoir construction at arsenic factory.

Key words: GMS; solute transport; groundwater contamination; numerical simulation; Dehou reservoir

拟建的德厚水库位于文山州盘龙河上游北西支源头德厚河和南西支源头咪哩河上, 距文山市约30 km, 是一座以城乡生活供水、工业供水、农业灌溉为主, 兼顾一定发电功能的大型水利枢纽工程, 水库正常蓄水位1 377.50 m, 水库总库容11 713万m³。在库区下游, 距德厚水库坝址约2.5 km, 与回水线淹没区直线距离500 m左右的岩溶洼地有一废弃砒霜厂, 2007年12月厂区内蓄水池垮塌, 大量高浓度含砷废水排入厂区, 由于厂区附近含水层主要为三叠系永宁镇组(T₁Y)碳酸盐岩, 岩溶裂隙发育, 地层渗

入条件好, 导致厂区附近地下水砷超标, 同时由于老厂管理不完善, 生产过程中未对砷进行严格控制, 含砷粉尘、废水以及废渣排入厂区, 导致厂区内土壤砷超标。为确保文山德厚水库的水质安全, 有必要对该砒霜厂影响范围内的地下水进行污染物运移的数值模拟研究, 判断污染源分布及污染羽扩展范围, 分析砒霜厂污染物运移对水库建设的影响。地下水溶质运移模拟是找出污染物迁移规律、确定污染范围及污染物浓度分布的重要手段^[1-3], 可以为合理开发地下水资源、优化设计地下水开采方案及地下水

污染修复提供定量依据。在岩溶发育地区,污染物在岩溶管道介质中扩散特点与松散岩类孔隙含水介质中存在巨大差异^[4],对于岩溶地下水污染问题,刘景兰等^[5]对西南典型岩溶区地下水污染情况和防污性评价方法进行了分析。对于裂隙岩溶含水层的数值模拟,2000年,吴吉春等^[6]通过研究裂隙分布规律把含水层概化为均质各向异性,对山西柳林泉裂隙发育区进行了溶质运移三维数值模拟;2001年,朱学愚等^[7]人采用等价多孔介质模型,对山东淄博市大武水源地裂隙岩溶水的污染物运移进行了数值研究。本次研究采用等价多孔介质模型,对裂隙岩溶水进行数值模拟,在模型校正时,通过合理调整渗透系数 K ,改善拟合效果,减少误差,并分别用三维渗透系数和渗透系数分区表征了含水层各向异性渗透性和非均质性。

1 研究区水文地质概况

1.1 水文地质条件

砒霜厂厂区所处的咪哩河流域岩溶水文地质单元,在地质构造上位于老寨大黑山向斜中部抬起端及北翼。单元内主要岩溶含水层组为永宁镇组(T_{1y})薄-中层状灰岩夹多层泥质灰岩、砂页岩、泥灰岩和个旧组(T_{2g})厚层隐晶-细晶质灰岩、白云岩(底部含砂页岩)岩溶发育中等-强烈。其中永宁镇组(T_{1y})由于存在多层相对隔水的页岩、泥灰岩及阻水断层,使该含水层地下水被分隔成较多的相对独立、规模较小的岩溶地下水子系统,例如,砒霜厂厂区的模拟计算区。

主要断裂有:①文-麻断裂(F1),区域性深大断裂,走向NW-SE,倾向NE,倾角 $50\sim 80^\circ$,断层带宽约 $40\sim 100\text{m}$,主要由碎裂岩、糜棱岩、断层角砾岩构成,为压扭性断裂,具有较好的阻水性,构成模拟计算区的东部边界;②布烈-白石岩断裂(F2),走向NE-SW,倾向SE,倾角 $50\sim 80^\circ$,属季里寨山字型构造体系,断层带宽 $5\sim 10\text{m}$,主要由碎裂岩、糜棱岩、断层角砾岩等构成,为压扭性断裂,阻水。

咪哩河流域岩溶水文地质单元内,地下水总体自南向北、自西向东运移,最终汇入北部的德厚河。砒霜厂附近,东部以 T_{1y} 顶部与 T_{2g}^1 底部的碎屑岩(页岩、泥岩、砂岩)夹层为界,发源于咪哩河河流东岸的岩溶地下水受走向与河流平行的隔水碎屑岩下层的阻挡,地下水主要垂直岩层面的裂隙,或沿溶蚀裂隙、自东向西运移,受咪哩河下切出露。

1.2 裂隙岩溶含水层的水力特征

研究区的裂隙岩溶含水层为沿节理或层面等原有裂隙溶蚀加宽后的岩溶裂隙网络^[8]系统,地下水多赋存于岩溶裂隙、孔洞中,在强岩溶发育带,大的溶蚀裂隙形成地下水集中流动的强径流带,即优势流带,成为地下水和污染物的主要通道。在优势流带导水系数高,而在岩溶不发育地带导水系数小,非均质性明显。各向异性也明显,垂直方向(z 轴)的渗透系数约为沿优势流带方向(x 轴)的渗透系数的 0.1288 倍左右,垂直(y 轴)于该优势方向的渗透系数约为沿优势流带方向(x 轴)的渗透系数的 0.6913 倍左右。由于研究区地下水优势流带的流速很大,因此地下水中污染物运移问题是对流占绝对优势的问题,弥散所起的作用很小^[9]。

为了了解实际情况下研究区三叠系碳酸盐岩岩体中的各向异性的渗透性,本次研究通过对岩溶裂隙和岩溶洼地的统计分析解决三维渗透系数的选取问题。通过对44组代表性的三叠系碳酸盐岩露头的裂隙实际野外测量和统计,辅以工作区域内的34个岩溶洼地的长轴、短轴及深度的数值统计分析,得出三叠系永宁镇组(T_{1y})渗透优势方向为北西 350° 方向,且三维渗透系数之间的关系如下:

$$\begin{cases} K_y = 0.6913 K_x \\ K_z = 0.1288 K_x \end{cases}$$

1.3 地下水污染现状

根据前期监测数据显示,地下水污染范围确定为厂区所在的整个岩溶洼地(以四周山脊线为界)和厂区与抽水泵房沿咪哩河上游 230m 左右、下游方向 120m 左右的范围内。厂区内地下水水位以及砷含量变化较大,地下水超标主要集中在厂区中央,循环水池附近以及抽水泵房。

本次研究在砒霜厂所在水文洼地内布设了7个水文地质钻孔,取地下水水样进行检测,并对砒霜厂地下水流场、污染物溶质运移进行了数值模拟。依据《地下水质量标准》(GB/T14848-93),水样检测结果表明:砒霜厂厂区内各钻孔水样中砷(As)含量均超标,低于地下水V类水质标准,其中ZK06水样的砷(As)含量为 22.096mg/L ,严重超标。

为了进行对比分析,本次取砒霜厂西南方向的咪哩河河水水样进行检测,检测结果表明:咪哩河河水砷(As)含量小于 0.005mg/L ,达到地表水I类水质标准。

2 数学模型

采用等价多孔介质模型对研究区裂隙岩溶水进

数值模拟。研究地下水污染物的运移研究,必须同时满足地下水水头方程和对流弥散方程。研究区采用三维溶质运移模拟,在垂向上仅一层潜水含水层。

三维潜水含水层地下水运动方程^[9]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

式中: H 为参考水头; K 为渗透系数张量。

本研究区为污染物运移对流占优势,在不考虑吸附、源汇项、化学反应等原因所引起的污染物浓度变化的情况下,地下水中的溶质运移满足三维对流-弥散方程^[9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z}) - \frac{\partial(u_x C)}{\partial x} - \frac{\partial(u_y C)}{\partial y} - \frac{\partial(u_z C)}{\partial z} \quad (2)$$

初始条件:

$$C(x, y, z, t) |_{t=0} = C_0(x, y, z) \\ x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \quad (3)$$

第一类边界条件(已知浓度的边界条件):

$$C(x, y, z, t) |_{\tau_1} = C_1(x, y, z, t) \\ x, y, z \in \tau_1, t \geq 0 \quad (4)$$

第二类边界条件(通过该边界的溶质通量已知):

$$-(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_i}) |_{\tau_2} = f_i(x, y, z) \\ x, y, z \in \tau_2, t \geq 0 \quad (5)$$

式中: Ω 为渗流区域; t 为时间; d ; C 为地下水中的污染物浓度,mg/L; D_{ij} 为水动力弥散系数,m²/d; u_i 为地下水实际平均流速,m/d。

3 数值模拟及其结果

3.1 模型的建立

3.1.1 研究区模型概化 该砒霜厂位于德厚水库库区咪哩河下游,距文山县马塘镇西北约3 km的播烈村一岩溶洼地,洼地长轴长144.72 m,长轴方向76°,短轴长87.88 m。距水库坝址约2.5 km,与回水线淹没区直线距离仅500 m。

根据水文地质条件,模拟计算区北部和西部边界大致位于中棵朵-播烈-陡坡箐-精怪塘一带,以飞仙关组(T₁f)粉砂质页岩夹细砂岩作为隔水边界;东部边界大致位于中棵朵-下棵朵-大汤坝一带,以文-麻区域深大断裂(F1)阻水断裂作为隔水边界;南东部界大致位于塘子寨-河尾子一带,以永宁镇组(T₁y)的砂页岩夹层带作为隔水边界;南西部以咪哩河作为流量边界,面积约4.2 km²。咪哩河

流经单元南西部,构成了地下水的排泄基准。地下水通过侧向径流的方式排泄入河中,部分河谷切割较深地区,地下水以泉的形式排泄入河流中。在整个单元中,仅砒霜厂附近地下水因流动受阻,在飞仙关组(T₁f)粉砂质页岩夹细砂岩与永宁镇组(T₁y)碳酸盐岩交界带处以泉的形式排泄。泉以及河流为区内地下水的主要排泄方式。单元主要接受降水补给,无其他补给来源。

3.1.2 网格剖分与模型边界 根据研究区地下水系统特征,在垂向上概化为一层潜水含水层。在平面方向上,模型西、北、东三面为连续的隔水边界,南西部及单元北部以河流作为流量边界,按50 m×50 m网格进行剖分,共划分为2 400个单元格,例外砒霜厂周围的单元格加密为25 m×25 m的单元格。

3.1.3 源汇项

(1)补给项。模拟计算区地下水主要接受降水补给,据统计文山市德厚镇降水量为918.98 mm/a,当地降水入渗系数为0.42,由此可计算出降水补给地下水的量为0.001 056 mm/d。

(2)排泄项。模拟计算区地下水排泄方式主要为泉排泄,砒霜厂附近地下水流动受泉点S40影响较大,据野外调查资料,S40流量约为7 L/s,标高1 348 m。

3.1.4 水文地质参数

(1)渗透系数。通过对砒霜厂所属范围内钻孔ZK05和ZK07进行现场抽水试验,计算出渗透系数分别为0.03416和1.97441 m/d。含水层永宁镇组(T₁y)有明显的非均质性,根据可能的地下水径流方向,对模拟计算区不同地段的渗透系数作0.075、1.0、0.65、0.06、0.02、0.08、0.2和0.3 m/d不同值的8个分区。

(2)有效孔隙度。根据经验值,有效孔隙度取值0.2。

(3)纵向弥散系数及弥散度。弥散系数具有明显的尺度效应,多数学者认为它是由介质的非均匀性引起的^[10],区域尺度较大时其尺度效益明显;本研究区面积较小,选用经验值,纵向弥散系数为37 m²/d,横向与纵向弥散系数比为0.2,垂向与纵向弥散系数比为0.04。

3.2 模型的识别和验证

3.2.1 流场模拟

(1)流场验证。整个水文地质单元没有大型水源地或其他用途大抽水量的抽水井,所以可以认为单元内地下水处于天然状态,即可以用稳定流来模

拟本区地下水。流场的模拟利用GMS6.0软件。

在模拟区内可利用ZK7、ZK9、ZK10、ZK18四个钻孔揭露的含水层初始水位(见表1)作为模型验证依据之一,钻孔水位观测误差均设定为5m。在GMS6.0软件中观测孔数据与软件计算数据有如下关系,如果观测值与计算值的差在校核置信范围内,误差棒会显示为绿色;如果超出校核置信范围,但小于200%,误差棒会显示为黄色;如果超出200%以上,误差棒会显示为红色。软件模拟结果误差棒均为绿色,显示各个观测孔处计算水位均在设定误差范围内,其中ZK18基本无误差,ZK7和ZK10误差很小,ZK9误差相对较大。由模拟出来的流场可知:研究区东北部的地下水流整体向北径流,汇入河流;而西南部的地下水整体向西径流,汇入咪哩河。

表1 钻孔水位表 m

钻孔	ZK7	ZK9	ZK10	ZK18
水位	1358.86	1363.53	1354.09	1346.00

(2)水均衡验证。天然情况下,含水层的接受的多年平均补给量近似等于多年平均排泄量。在模拟区内,含水层仅接受降水补给,补给量为已知量。模拟计算区含水层的排泄量主要为泉排泄,泉S40为模型中的主要泉点,实测流量约为7 L/s,即604.8 m³/d,计算泉排泄量约为596.2 m³/d,相对误差1.4%。

综上所述,模型在流场和水量均衡两方面均与实际情况较为吻合,所以可以认为模型相对合理。

3.2.2 溶质运移模拟 为了在水流模拟的基础上建立溶质运移模型,假设整个岩溶洼范围内的含水层地均被污染。由于条件限制,本次模拟不考虑污染物的吸附、反应、衰减等过程;对于污染物的初始浓度,采用参数反演的的方法设定,即先输入一个初始浓度,在模型运算结束后查看污染场地的计算浓度与实际检测浓度是否吻合,反复循环直到找到与现状相匹配的初始浓度。模拟时间为2007-2013年共7年,时间步长为30 d。模拟结果显示:地下水污染范围为厂区所在的整个岩溶洼地和厂区与抽水泵房沿咪哩河上游230 m左右、下游方向120 m左右的范围内;地下水超标主要集中在厂区中央循环水池附近,最大砷(As)含量大于21 mg/L;由洼地中央循环水池附近往外延伸,砷(As)含量依次降低,其中砷(As)含量在10~21 mg/L的分布面积较大,0.051~1 mg/L的分布面积次之,砷(As)含量在1

~10 mg/L的分布面积较小,石桥坡附近一带砷(As)含量为0.049~0.051 mg/L;0.05 mg/L的浓度等值线主体目前并未进入水库回水线内。

因为污染源附近无抽水井或其他条件改变天然流场,污染物运移仅受天然水动力条件控制,加之污染场地处在局部地下分水岭附近,所以污染物扩展非常缓慢,0.05 mg/L的浓度等值线主体目前并未进入水库回水线内。水库建成之后,因水库蓄水,库区水头升高,回水线标高1377.5 m,高于砒霜厂内部(低于1365 m,见表1)水头,库区及其周边范围内地下水流场发生变化,预测地下水向北东径流,径流的水力梯度较大。在裂隙岩溶含水层中,溶隙网络中的地下水向优势流带汇集,随水流动的污染物也向优势流带汇集^[11]。因此,污染物将随水流向北东方向运移,对水库影响小,可能对下游的泉点水质有一定影响,需定期监测水库下游泉点水质。在咪哩河东岸水库的回水线之外拟建防渗帷幕,可以防止砒霜厂厂区附近已污染水体与库区水体的水利联系,从而解决砒霜厂对水库的水质安全隐患。

4 结 语

(1)利用GMS软件建立地下水流场模型和溶质运移模型,对裂隙岩溶水的流场和污染物进行了数值研究。所建立的模型是合理的,符合当地的实际情况,能反映研究区裂隙岩溶地下水的流场以及污染物溶质运移和浓度变化规律,判断出了污染源分布及污染羽扩展范围,利用溶质运移模型,探讨了水库建成之后砒霜厂污染物运移对水库建设的影响。

(2)在分析德厚水库咪哩河流域裂隙岩溶含水层的水力性质和污染物运移特征的基础上,采用等价多孔介质模型,对裂隙岩溶水的流场和溶质运移过程进行数值模拟。裂隙岩溶含水层不同于多孔介质,存在强烈的各向异性和分均质性,采用等价多孔介质模型通过对岩溶裂隙和岩溶洼地的统计分析解决三维渗透系数的选取问题,表征了实际情况下研究区三叠系碳酸盐岩岩体中的各向异性的渗透性;通过对渗透系数做分区处理,在该模型适宜尺度范围内对含水层非均质性进行了表示。模型模拟结果能反映实际情况,该方法在技术上是可行的,可以对裂隙岩溶水污染物运移研究提供一定依据。

(3)本文不足之处:由于条件限制,本次模拟不考虑淋滤作用、化学反应、吸附作用等过程所引起的污染物浓度变化。

(下转第217页)

径流预测的 MRE 和 $\max RE$ 分别为 3.4596%、9.3035%, 预测精度和泛化能力均优于 GA-BP 和传统 BP, 表明 CV 能有效对 SVR 惩罚因子 C 和核函数参数 g 进行搜寻。CV-SVR 模型具有预测精度高、泛化能力强以及稳定性能好等特点, 可以满足年径流预测的精度要求。②从图 1~2 可以看出, CV-SVR 模型能对长达 35 年的革雷站年径流进行拟合及预测中, 其相对误差在 $-10\% \sim 5\%$ 之间变化, 表明 CV-SVR 模型具有较好的拟合及预测效果。③从表 2 可以看出, 由于传统 BP 神经网络由于是基于渐近理论, 仅在样本容量趋向于无穷大时其经验风险才趋近于实际风险, 因此在本实例应用中, 传统 BP 模型因得不到充分训练而导致其预测精度、外推能力及稳健性能均不够理想。④在相同网络结构、传递函数、训练函数及期望误差等条件下, GA-BP 模型预测精度、泛化能力均优于传统 BP 模型, 表明 GA 能有效优化 BP 网络初始权值和阈值。

4 结 语

在给定不敏感系数 ε 和径向基核函数条件下, 提出 SVR 模型惩罚因子 C 和核函数参数 g 的 CV 搜寻方法, 构建 CV-SVR 多元变量年径流预测模型, 以云南省革雷站年径流预测为例进行实例分析, 并构建 GA-BP 和传统 BP 模型作为对比模型。验证及对比结果表明 CV 能有效对 SVR 惩罚因子和核函数参数进行搜寻。CV-SVR 模型具有预测精度高、泛化能力强以及稳定性能好等特点, 模型及方法可为相关预测研究提供参考。当然采用启发式算法, 如

PSO、GA 等与 CV 相结合的耦合式算法以期提高 SVR 模型的预测精度是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 崔东文. 多隐层 BP 神经网络模型在径流预测中的应用[J]. 水文, 2013, 33(1): 68-73.
- [2] 邓霞, 董晓华, 薄会娟. 基于 BP 网络的河道径流预报方法与应用[J]. 人民长江, 2010, 41(2): 56-59.
- [3] 张德丰, 等. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] 张良均, 曹晶, 蒋世忠. 神经网络实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 崔东文. 支持向量机在水资源类综合评价中的应用研究——以全国 31 个省级行政区水资源合理性配置为例[J]. 水资源保护, 2013, 29(5): 20-27.
- [6] Vladimir N. Vapnik. 张学工译. 统计学习理论的本质[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [7] 田景文, 高美娟. 人工神经网络算法研究及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [8] 王雷. 学术前沿研究支持向量机在汽轮机状态监测中的应用[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2012.
- [9] 崔东文, 郭荣. 基于几种参数优化的支持向量机在径流预报中的比较分析[J]. 水资源研究, 2013, 34(2): 34-38.
- [10] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [11] 崔东文. 支持向量机在湖库营养状态识别中的应用研究[J]. 水资源保护, 2013, 29(4): 26-30.
- [12] 崔东文. 基于模式识别的区域水资源与经济社会协调度评价[J]. 水利经济, 2013, 31(5): 15-19.

(上接第 212 页)

参考文献:

- [1] 薛红琴. 地下水溶质运移模型应用研究现状与发展[J]. 勘察科学技术, 2008(6): 17-22.
- [2] 吴夏懿, 束龙仓. 开采条件下的地下水溶质运移规律的研究——以山东济宁漏斗区为例[J]. 工程勘察, 2006(2): 27-31.
- [3] 王喆, 卢丽, 夏日元. 基于 GMS 的北京西郊垃圾场地下水溶质运移模拟[J]. 人民黄河, 2012, 34(11): 85-87+90.
- [4] 钟春里. 岩溶管道系统中污染物扩散及地下水自净能力研究——贵州某磷石膏堆场为例[J]. 贵州地质, 2011, 28(2): 126-130.
- [5] 刘景兰, 李立伟, 张甲恩, 等. 西南典型岩溶区地下水防污性评价方法[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 88-92.
- [6] 吴吉春, 薛禹群, 黄海, 等. 山西柳林泉裂隙发育区溶质运移三维数值模拟[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2000, 36(6): 728-734.
- [7] 朱学愚, 刘建立. 山东淄博市大武水源地裂隙岩溶水中污染物运移的数值研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 171-178.
- [8] 王喆, 卢丽, 夏日元, 等. 岩溶地下水系统演化的数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(7): 22-28.
- [9] 吴吉春, 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [10] 王锦国, 周志芳. 裂隙岩体地下水溶质运移的尺度问题[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 239-245.
- [11] 郭飞, 朱学愚, 刘建立, 等. 山东淄博裂隙岩溶水中污染物运移的数值模拟及治污措施[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 57-63.