

GMS 模型的水文水质模拟应用研究

朱君妍, 李翠梅, 贺靖雄, 项 颂

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘 要: GMS 模型是应用广泛的地下水水文模拟系统。以昆山市某古镇为研究区域, 采用 GMS 模型对其水文水质进行模拟研究。通过用概化方法建立水文地质概念模型和数学模型, 用反演迭代方法矫正模型的主要参数等过程, 分别用 MODFLOW 和 MT3DMS 模块模拟和预测了研究区水文水质状况和污染物迁移趋势。数据对比结果显示, 模拟值与检测值基本一致, 表明校正后的 GMS 模型能较好再现地下水流系统特征, 并能应用于流域污染物扩散过程的模拟和预测中, 对地下水污染物的迁移趋势进行分析, 以便及时采取有效措施控制污染源。

关键词: GMS 模型; 水文水质; 模拟; 预测; 地下水; 污染物

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2019)01-0066-08

1 引言

地下水作为一种自然资源, 具有复杂性、系统性、稀缺性、再生性差等独特的水文特性^[1,2], 一旦受到污染, 水体很难修复, 还会引发一系列环境问题。全国七大水系中 70% 以上的河段受到污染, 90% 的江河湖泊呈现富营养化状态, 33% 的地下水受到轻度污染, 64% 的城市地下水遭受有机和无机有毒有害污染物的污染而不能作为饮用水源^[3,4]。为此, 国内外众多学者展开了对地下水污染物质迁移过程的研究, 从水文特征、水力特性及动力学等方面对污染物质扩散过程进行分析, 并借助于计算机等辅助工具进行污染物质运移过程的模拟^[5]。地下水模拟系统 GMS 是由美国伯明翰大学环境模拟研究所和美国军队排水工程试验工作站将现有地下水模拟软件集成, 形成的三维地下水模拟综合软件包^[6]。GMS 包含多个模块, 不仅涵盖地下水模拟的所有内容, 同时具备设计和数据显像可视化功能。全晓霞等^[6]运用 GMS 模型对某垃圾场地下水污染进行研究。赵红红等^[7]使用 GMS 中 SEEP2D 模块对心墙堆石坝进行二维稳定流分析。MT3DMS 是模拟地下水系统中对流、弥散和化学反应的三维溶质运移模型, 须和 MODFLOW 一起使用^[8]。

昆山市某古镇是我国知名的水乡, 2000 年左右为了解决生活污水直排入河的污染问题, 在全镇每户人家设置了下渗式粪坑, 将生活污水全部排入下渗式粪坑, 再由下渗式粪坑下渗进入土壤和地下水。下渗式粪坑建成使用以来, 前 5 年左右, 原先被污染的河道呈现了明显的水质恢复, 水体黑臭现象基本消除^[9,10]。然而, 随着时间的推移, 在没有其他外源污染的情况下, 10 年左右河道又出现了不同程度的黑臭现象: 大部分河道为深咖啡色、水生植物生长速度快、面积大, 具有典型的富营养化状态。给居民生活和古镇旅游带来了负面影响。为此, 展开地下水污染的迁移过程非常必要。

本研究以该古镇为研究对象, 在调研该镇水文地质基础资料的基础上, 建立了水文水质数学模型, 应用 GMS 软件对其进行各项主要参数校正和验证, 并用 MODFLOW 模块和 MT3DMS 模块模拟分析古镇区域水文水质特征和污染物在地下水中迁移趋势。

2 研究区概况

昆山市位于长江三角洲太湖平原下游, 属于冲积平原地貌, 主要表现为北部低洼区, 中部半高田区和南部湖荡区, 地面下浅层土体形成于第四纪晚更新世, 主要以浅海、冲湖积-滨海相碎屑沉积物为主。该

收稿日期: 2017-09-28

基金项目: 苏州市水利科技项目“亚硝酸及其前体物系统检测与分析研究(2017003)”

作者简介: 朱君妍(1994-), 女, 江苏常州人, 研究生在读, 主要从事给水处理与安全供水保障技术研究。E-mail: 1293569458@qq.com

通讯作者: 李翠梅(1974-), 女, 江苏苏州人, 教授, 硕士, 主要从事市政与环境工程科研、实践与教学工作。E-mail: cuimeili@163.com

古镇区中心地势较平坦,水网密集。整个片区总面积为0.37km²,水域面积占总面积27.8%,总户数为1600户。

研究区属亚热带南部季风气候区,气候温和湿润,光照充足,雨量充沛,无霜期长,雨热同期。据统计资料(1982~2012),该古镇年平均气温为15.4℃,年平均降水量1133.3mm,年日照为1994.5h,无霜期220d,多年平均水面蒸发量为822.2mm。研究区内土质以软弱、中软土为主,主要有粉粘土、淤泥质粉粘土、亚粘土、轻亚粘土等;地下含水层属于松散沉积物含水层,厚度在5~10m之间,孔隙发育,富水性好,导水性能良好,水资源丰富;潜水含水层富水性取决于岩性和厚度,水位深浅与区域地貌、河湖等地表水体相关,且受降雨蒸发及补排影响。考虑到下渗式粪坑平均深度在2m以内,且研究区浅层含水层组活动活跃,因此选取浅层地下水作为研究对象。

3 模型建立

3.1 水文地质概念模型

经过对研究区的水文地质进行勘探测绘,结合收集的场地土壤地质、河流水文水质等资料,对其进行高度科学概化,并通过拓扑关系得到场地水文概念模型^[11]。由图1知,地下水流系统埋深浅,以孔隙潜水为主,且潜水含水层间无稳定隔水层,可概化为具有统一水力联系的潜水含水层。

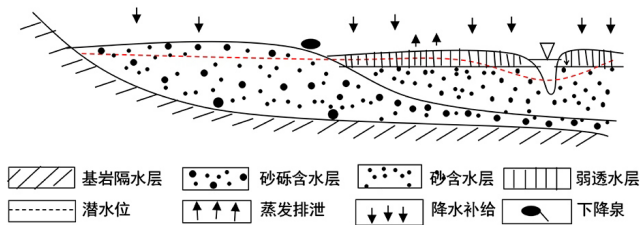


图1 研究区地下潜水层剖面图

Fig.1 The phreatic aquifer in the study area

3.2 地下水污染过程数学模型

本文采用确定性模型之一的对流-弥散模型^[12]来描述地下水流和污染质扩散过程,两者均以达西定律为理论基础。在已建立的概念模型的基础上,用简洁的数学关系^[13,14]将概念模型的拓扑关系转换为相应的数量关系和空间形式,以此来反映研究区地质体的真实特征。

(1) 地下水水流数学模型

由上述概念模型知,研究区地下水流属三维潜水流动系统,具体数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \varepsilon = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega, t > 0 \\ H(x, y, z, t)|_{t=0} = H_0(x, y, z) & (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t)|_{\Gamma} = H_1(x, y, z) & (x, y, z) \in \Gamma \\ K \frac{\partial H}{\partial n} |_{(x, y, z) \in B_1} = Q(x, y, z, t) & (x, y, z) \in B_1, t > 0 \\ K \frac{\partial H}{\partial n} |_{(x, y, z) \in B_2} = Q(x, y, z, t) & (x, y, z) \in B_2, t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为地下水水头(m); K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 分别为 x, y, z 方向渗透系数(m/d); μ_s 为含水层给水度; H_0 为含水层初始水头(m); Ω 为渗流区域; H_1 为各层边界水位(m); Γ 为各层边界条件; ε 为源汇项强度(m/d); Q 为含水层边界单位面积过水断面补给流量(m/d); K 为渗透系数; n 为渗流区边界的单位外法线方向; B_1 为定水头边界,第一类边界; B_2 为零流量边界,第二类边界。

(2) 污染物迁移数学模型

根据研究区的实际情况,可建立地下水污染质迁移数学模型:

$$\begin{cases} R_d \theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial X_j} \right) - \frac{\partial}{\partial X_i} (\theta v_i C) + q_s C_s - \theta \lambda C - \lambda \rho_b \bar{C} \\ R_d = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_d \\ D_{ij} |_{i=j} = f(\alpha_L, \alpha_{TH}, \alpha_{TV}, v_x^2, v_y^2, v_z^2) / |v| + D^* \\ D_{ij} |_{i \neq j} = D_{ji} = f(\alpha_L, \alpha_{TH}, \alpha_{TV}, v_i v_j) / |v| \end{cases} \quad (2)$$

初始边界条件: $C(x, y, 0) = C_0(x, y)$; $C|_{B_1} = f_1(x, y, t)$

式中: C 为溶解于水中的污染物的浓度,ML⁻³; θ 为地层介质的孔隙度,无量纲; R_d 为阻滞因子,无量纲; X 为运移的距离,L; v 为渗透速度,L/T; D_{ij} 为水动力弥散系数张量,L²/T; q_s 为源/汇单位体积含水层流量,T⁻¹; C_s 为源/汇水流中组分的浓度,ML⁻³; ρ_b 为介质容重; λ 为组分降解常数; $\bar{C}$ 为组分的吸附浓度; B_1 为第一类边界; f_1 为边界浓度,ML⁻³; K_d 为分配系数。

研究区污染物扩散数学模型,包含水流和溶质迁移两部分,由控制方程、定解条件构成,定解条件包括边界和初始条件。三维非稳定流水流模型,边界条件概化为第一类或第二类边界;污染质迁移模型,边界条件概化为第一类边界,两者初始条件分别为初始时刻流场含水层初始水头及边界浓度。

3.3 模型参数设定

本文的模型参数是在对实测资料进行分析的基础上,通过参数优选间接得到^[15,16],确定了可直接建立的参数有空间步长、时间离散、渗透系数、边界条件和所需校准的参数有 K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 、 θ 、 α_L 、 α_{TH} 、 α_{TV} 、 ρ_b 、 K_d 、 λ_1 、 λ_2 ,并以水层水位和水层流量为模拟因子对其进行校准和可行性分析。

(1)空间网格分布

研究区东西向长约 707.216m,南北宽约523.177m,垂向高约 45m,总面积为 0.37km²。根据区内水文地质条件及含水层边界的几何形状,将其平面近似剖分为 30 行,27 列,垂向剖分为 2 层,总共 1 620 个单元,其中有效计算单元 1 072 个,无效计算单元 548 个。

(2)时间离散

从 2016 年 11 月~2017 年 2 月,模拟时间长达 4 个月,分为模型校准和模型验证两个阶段,均以每个月 30d 为一个应力期,每个应力期离散为 6 个时间步长,间隔 5d。

(3)渗透系数/参数分区

本次模拟根据研究区含水层岩性、储存条件、导水性能、渗透能力及抽水试验选取参数,将研究区进行分区,并将参数初值赋予各区进行优化^[17,18],参数校准过程选用自动参数校准进行间接求参,主要依据水位进行拟合,观测水位通过各层观测井来获得,第一层 8 个观测井编号为 2、4、7、9、10、13、15、18,第二层 8 个观测井编号为 1、3、5、8、12、14、17、19,具体如图 2 所示。

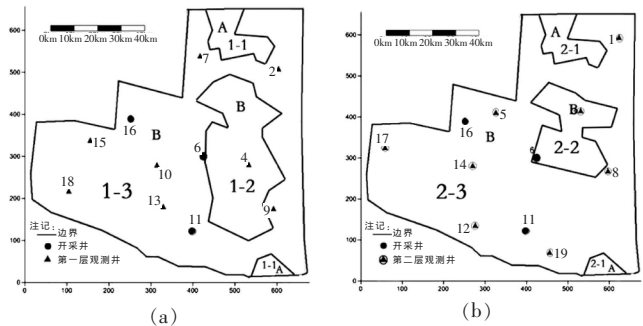


图2 渗透系数分区、开采井及观测井分布图(a.第一层;b.第二层)
Fig.2 The partitions of permeability and distribution of drilling and observing wells at 1st layer (a) and 2nd layer (b)

(4)边界条件

研究区潜水含水层上边界为水量交换边界,主要接受降雨入渗及地表渗漏,底部为隔水边界。潜水含水层东边和西边边界概化为第二类隔水边界,北边(湖荡部分除外)作为第二类边界;北边湖荡外边界概化为第

一类水头已知边界,南边一长年有水的河流取为第一类定水头边界,调用 GMS 中的 specied head 来概化,水头值均由初始流场得到。

3.4 模型参数优化

本文通过模型反演迭代求参^[19,20],适当调整各区的边界条件,得到各区的水文地质参数,模型的初始参数与优化参数见表 1 和 2。

表1 各区土层参数表(m·d⁻¹)
Table1 The soil parameters of all partitions

参数 分区	调参前			调参后		
	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}
1-1	1.03	1.03	0.149	0.97E-4	0.97E-4	0.8E-5
1-2	2.67	2.67	0.424	2.282	2.282	0.328
1-3	1.62	1.62	0.267	1.119	1.119	0.162
2-1	0.67	0.67	0.105	1.591	1.591	0.242
2-2	1.96	1.96	0.221	2.286	2.286	0.403
	μ_s	A	B	μ_s	A	B
		0.01	0.021		0.02	0.021

表2 溶质运移参数表
Table2 The solute migration parameters

参数分区	α_L / m	α_{TH} / m	α_{TV} / m	ρ_b	K_d / m·L ⁻¹	λ_1 / a ⁻¹	λ_2 / a ⁻¹
第一层	8	0.2	0.03	102	0.003	0.0001	0.0001
第二层	10	0.2	0.03	98	0.003	0.00005	0.00005

4 模型水文水质模拟校准

4.1 水文模拟校准结果

本文采用 MODFLOW 模块对各区地下水水流状况的模拟,采样监测与模拟同时长和同频率。每个应力期水位观测值与模拟值拟合^[20]情况相似,见图 3,各

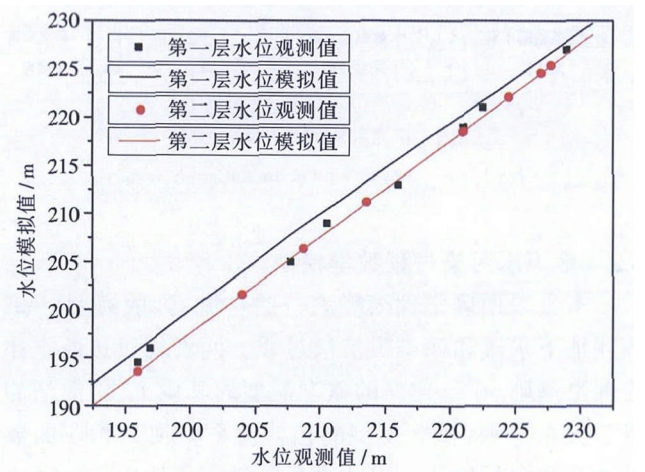


图3 地下水位观测值与计算值对比图
Fig.3 Comparison between the observed and calculated values of the groundwater level

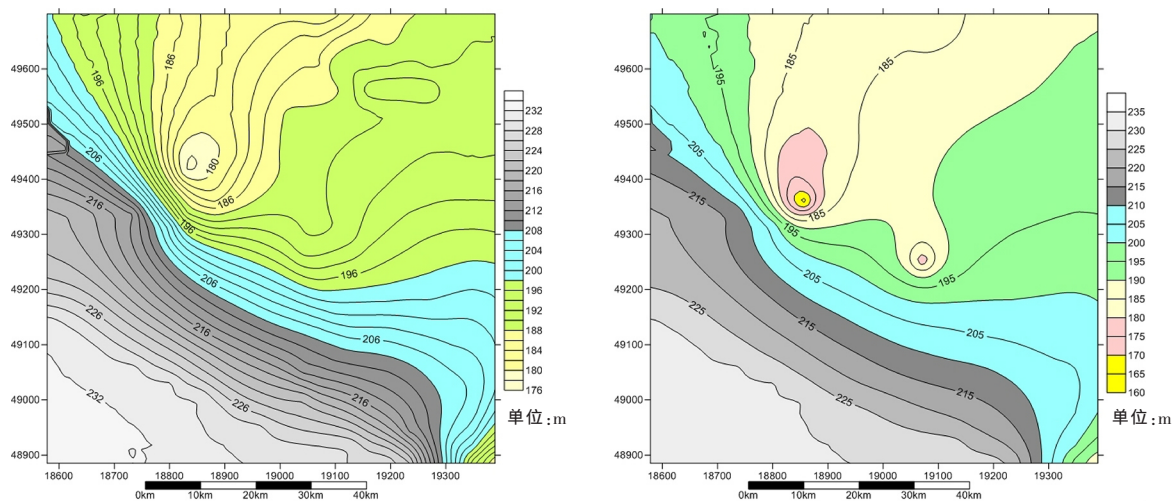


图 4 计算流场图(第一层左图,第二层右图)

Fig.4 Comparison between the observed and calculated values of the groundwater (the first layer (left), the second layer (right))

层模拟流场见图 4。

由以上地下水位观测值与计算值对比图知,拟合水位与观测水位基本一致且两者绝对误差小于 1m 的观测井占据所有观测井的 85%以上,即计算水位能较好的代表研究区实际地下水位。

4.2 水质模拟校准结果

本文选取了地下水层 X2、X4、X5、X8、X9、X11、X12 共 7 个监测点取水样,并确定了水质监测方法,以 I_{Mn} 和 NH_3-N 为主要监测因子,对研究区水体进行定期监测,将监测值和模拟值进行对比,对比结果见图 5~6。

由图 5 可知,地下水层 7 个监测点的 I_{Mn} 和 NH_3-N 浓度模拟值和监测值几乎一致, I_{Mn} 模拟值和监测值的相对误差为 2.86%, NH_3-N 模拟值和监测值的相对误差为 8.1%;由图 6 可知,X4 监测点 I_{Mn} 和 NH_3-N 浓度随时间变化的模拟值和监测值几乎一致, I_{Mn} 模拟值和监测值的相对误差为 5.63%, NH_3-N 模拟值和监测值的相对误差为 0.78%,表明本研究模拟过程基本准确,

GMS 模型模拟效果较好,适用于地下水水质状况模拟研究。

5 模型可靠性分析

从模拟结果来看,地下水系统参数区的划分和参数级别的大小及区域边界水量交换的强弱程度与场地实际特征基本相一致,比较合理的反映了场地实际情况,大多数模拟结果与观测井的野外观测值均能合理匹配,少数观测井因井位靠近开采井,模拟结果与观测值存在一定偏差。

对模型运行结果稳定性和收敛性的验证^[20],可通过考察不同应力期各个含水层各单元模型计算所得水量是否满足水均衡来说明,见表 3~4。

从水均衡表可见,模型验证阶段各个时期流入量和流出量基本一致,误差均小于 $0.5m^3/d$,满足水均衡要求,具有收敛性。因此,校正完的模型能较好再现原场地地下水流系统特征,可靠性强,且能应用于实践当中。

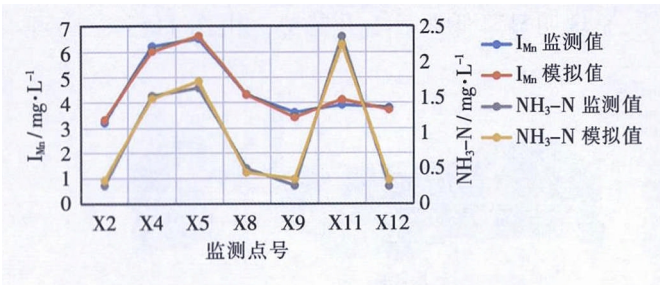


图 5 地下水 I_{Mn} 和 NH_3-N 浓度随监测点变化曲线

Fig.5 The curve of I_{Mn} and NH_3-N in groundwater at the monitoring points

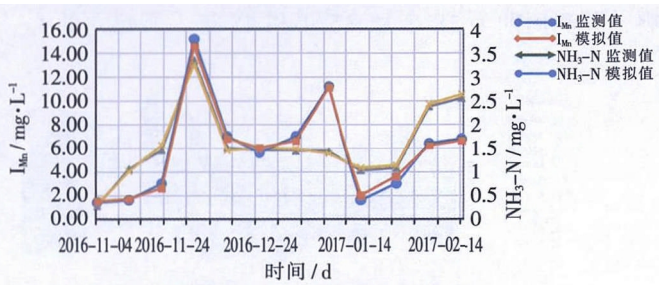


图 6 X4 监测点 I_{Mn} 和 NH_3-N 浓度随时间变化曲线

Fig.6 The curve of I_{Mn} and NH_3-N concentration change at X4 monitoring point

表3 2016/12/25各含水层流入流出量一览表(m³/d)
Table3 The various aquifer inflow and outflow on 2016/12/25

第一层						第二层					
边界		源汇项				边界		源汇项			
	流入	流出		流入			流入	流出		流入	流出
顶部	0	0	储存释放	0	66.37	顶部	3624.37	4510.77	储存释放	0	0
底部	4510.77	3624.37	定水头	3172.06	1395.39	底部	0	0	定水头	6217.78	5388.39
左边界	0	0	河渠补给	0	4764.72	左边界	0	0	河渠补给	0	0
右边界	0	0	井开采	0	0	右边界	0	0	井开采	0	0
前边界	0	0	入渗	2168.11	0	前边界	0	0	入渗	57.02	0
后边界	0	0				后边界	0	0			
总计		流入:9850.94;流出:9850.85				总计		流入:9899.17;流出:9889.16			

表4 2017/2/24各含水层流入流出量一览表(m³/d)
Table4 The various aquifer inflow and outflow on 2017/2/24

第一层						第二层					
边界		源汇项				边界		源汇项			
	流入	流出		流入	流出		流入	流出		流入	流出
顶部	0	0	储存释放	5.60	2.37	顶部	4208.72	3575.27	储存释放	0	0
底部	3575.27	4208.72	定水头	3526.38	1358.02	底部	0	0	定水头	6797.32	5152.34
左边界	0	0	河渠补给	0	3625.87	左边界	0	0	河渠补给	0	0
右边界	0	0	井开采	0	0	右边界	0	0	井开采	0	2333.33
前边界	0	0	入渗	2087.64	0	前边界	0	0	入渗	54.91	0
后边界	0	0				后边界	0	0			
总计		流入:9194.89;流出:9194.98				总计		流入:11060.95;流出:11060.94			

6 污染物扩散过程的模拟与预测

本文以空白背景为初始条件，对含水层第一层进行模拟，模拟区选定为研究区4号观测井附近的中心区域1-2,生活污水渗透点定为点源,共5个点源,每个点源排放流量为8.1m³/d,污染物I_{Mn}和NH₃-N浓度分别为15mg/L和1.5mg/L。通过建立污染物扩散模型，用MT3DMS模块对模拟区内的I_{Mn}和NH₃-N迁移趋势进行模拟并预测污水点源直接下渗对地下水的影

响，预测周期为18个月、15年和45年。所建立的I_{Mn}和NH₃-N扩散模型,经剖分后可观察模型横纵剖面两者浓度分布图,如图7~10所示;经过模拟,I_{Mn}和NH₃-N的扩散距离见表5,浓度变化见图11。

由图7~10可知,I_{Mn}和NH₃-N两者扩散机理不同,浓度变化趋势和污染扩散范围不同。由表5可知,在模拟的最初18个月内,两者扩散趋势基本一致,最大迁移距离均达到100m以上;在模拟的45年内,NH₃-N最大迁移距离仅为155m,远小于I_{Mn},可知NH₃-N受生物降解及化学反应等作用,扩散趋势减缓,呈现明显降低而后上升趋势。由图11(a)、(b)可

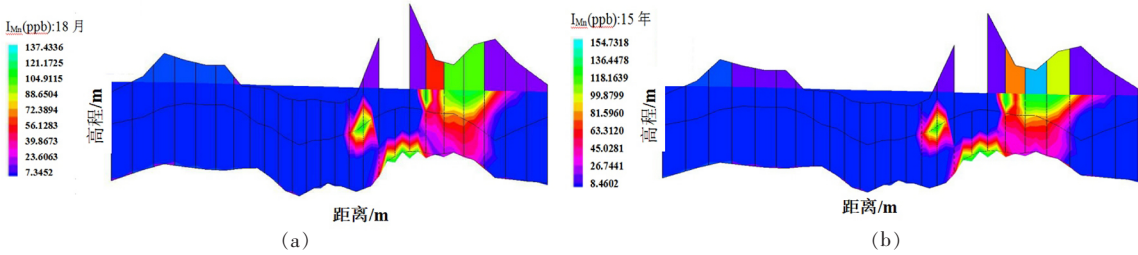


图7 I_{Mn} 运移模型剖分横剖面第15行(a.18个月;b. 15年)

Fig.7 The 15th line of the model subsection on I_{Mn}'s migration(a.18-month;b.15 years)

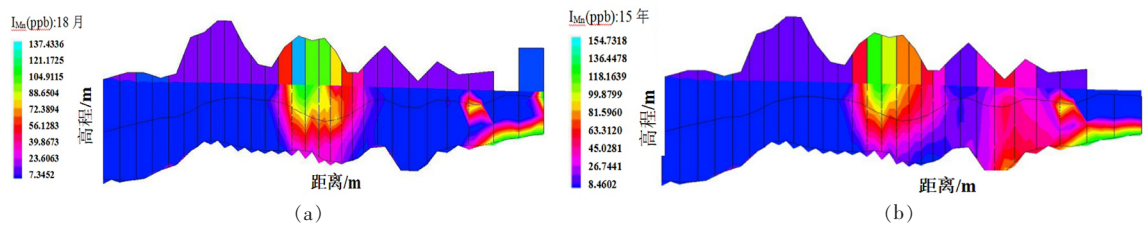


图 8 I_{mn} 运移模型剖分纵剖面第 23 列(a.18 个月;b.15 年)

Fig.8 The 23th row of the model subsection on I_{mn} 's migration (a.18-month;b.15 years)

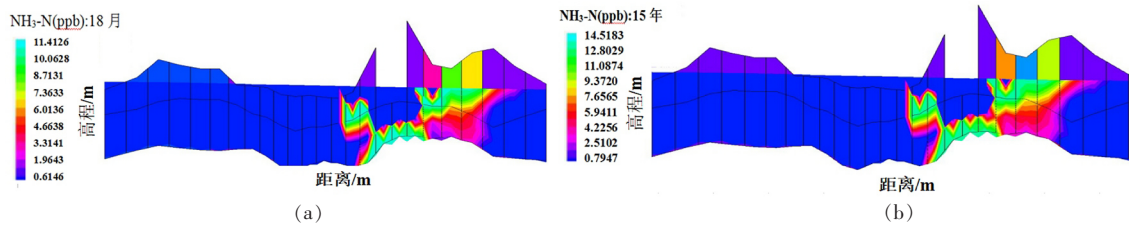


图 9 NH_3-N 运移模型剖分横剖面第 15 行(a.18个月;b.15 年)

Fig.9 The 15th line of the model subsection on NH_3-N 's migration (a.18-month; b.15 years)

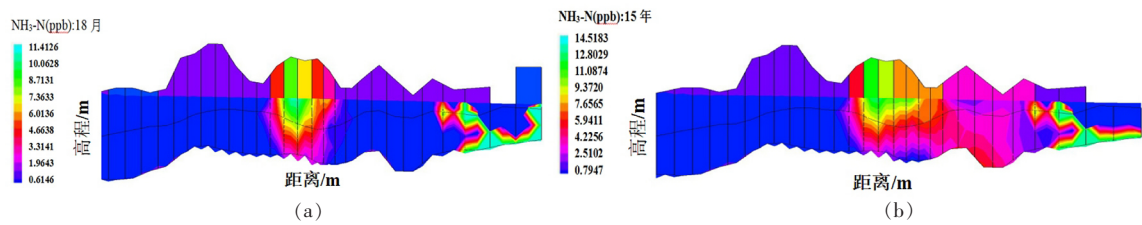


图 10 NH_3-N 运移模型剖分纵剖面第 23 列(a.18 个月;b.15 年)

Fig.10 The 23th row of the model subsection on NH_3-N 's migration (a.18-month; b.15 years)

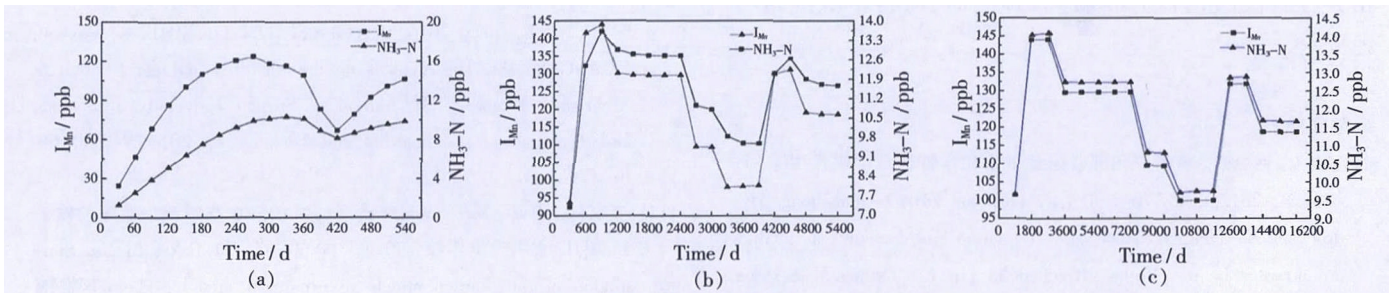


图 11 4 号观测孔处地下水 I_{mn} 和 NH_3-N 计算浓度随时间变化曲线(a.18 个月;b.15 年;c.45 年)

Fig.11 Curve of calculated I_{mn} and NH_3-N concentration in groundwater with the time change at NO.4 observed hole(a.18-month;b.15 years;c.45 years)

表5 地下水主要组分最大迁移距离				
Table5 The maximum migration distance of the main components of groundwater				
时间	I_{mn} 最大迁移距离 / m	I_{mn} 渗入地下水总量 / kg	NH_3-N 最大迁移距离 / m	NH_3-N 渗入地下水总量 / kg
18 个月	125	130.83	114	13.98
15 年	256	206.73	188	22.57
45 年	368	254.22	272	28.56

知,4 号观测井处模拟因子浓度随迁移时间延长周期性变化,在模拟初期,4 号观测井处两者浓度均大幅度升高,18 个月内 I_{mn} 和 NH_3-N 浓度最大分别达到 0.12mg/L 和 0.01mg/L。由图 11(c)可知,45 年后 I_{mn} 和 NH_3-N 的最低浓度分别降至 0.1mg/L 和 0.0097mg/L,并且 I_{mn} 和

NH_3-N 浓度变化趋势随时间延长逐渐趋于一致。

由模拟结果表 5 可知,研究区内生活污水下渗对地下水污染极其严重,污水通过土壤层下渗及扩散,使地下水中 NH_3-N 和 I_{mn} 浓度升高,对地下水水质安全存在一定威胁,应及时采取有效措施控制污染源扩散。

7 结论

(1)本次模拟时,对研究区进行了实地调研。结合研究区水文水质现状,将水文地质概念模型转换为地下水流和溶质迁移数学模型,以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 I_{Mn} 为主要模拟因子,用参数校准后的模型模拟研究区水文水质状况。模拟结果显示,拟合水位与观测水位基本一致,85%以上的观测井绝对误差小于 1m; $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 I_{Mn} 浓度的模拟值和观测值较吻合。表明建立的污染物扩散模型准确可靠,能很好的还原场地实况,详尽透彻地描述场地特征、水位变化规律。

(2)研究发现,用 GMS 模型就研究区的污染物扩散过程进行预测和分析,模拟了 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 I_{Mn} 在 18 个月、15 年和 45 年预测时段内的横向、纵向的迁移趋势,通过模拟剖面图和表格数据分析,预测到随着时间的推移,污染物会不断下渗且迁移距离逐年增加,对地下水水质安全存在一定威胁,应及时采取有效措施控制污染源扩散。

(3)使用 GMS 模型对地下水水文水质状况进行模拟及预测,有利于我国对地下水污染状况进行了解并采取合理治理和维护措施。但是污染物迁移速率快慢及扩散范围的大小与地下水的开采量,开采强度密切相关,因此在进行污染物迁移预测时,应将影响因素考虑周全。

参考文献:

- [1] 安乐生,赵全升. 黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用[J]. 环境科学, 2012,33(2):370-378. (AN Lesheng, ZHAO Quansheng. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the Yellow River delta [J]. Environmental Science, 2012,33(2):370-378. (in Chinese))
- [2] 于云江,杨彦. 基于 GIS 的松花江沿岸某浅层地下水污染特征及人群暴露风险评价[J]. 中国环境科学, 2013,33(8):1487-1494. (YU Yunjiang, YANG Yan. The pollution characteristics and the crowd exposure risk assessment of shallow groundwater in an area of the Songhua river basin based on the GIS[J]. China Environmental Science, 2013,33(8):1487-1494. (in Chinese))
- [3] 吕睿. 浅谈我国水资源保护[J]. 黑河学刊, 2017,229(1):1-3. (LV Rui. Brief discussion on the protection of water resources in China [J]. Heihe Journal, 2017,229(1):1-3. (in Chinese))
- [4] 李仁仲. 浅谈我国水资源污染的现状、原因及对策[J]. 科技创新导报, 2015,10(7):113. (LI Renzhong. Brief discussion on the current situation, causes and countermeasures of water pollution in China [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015,10(7):113. (in Chinese))
- [5] 孙从军,韩振波. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程, 2013,31(5):9-13. (SUN Congjun, HAN Zhenbo. Advances in research and application of groundwater numerical simulation [J]. Environmental Engineering, 2013,31(5):9-13. (in Chinese))
- [6] 全晓霞,宁立波. 运用 GMS 模型对某垃圾场地下水污染的研究[J]. 环境科学与技术, 2012,35(7):197-201. (TONG Xiaoxia, NING Libo. GMS model for assessment and prediction of groundwater pollution of a garbage dumping site in Luoyang [J]. Environmental Science & Technology, 2012,35(7):197-201. (in Chinese))
- [7] 赵红红,陈振华,赵忠伟. GMS 在心墙堆石坝二维稳定渗流分析中的应用[J]. 水电能源科学, 2008,4:74-76. (ZHAO Honghong, CHEN Zhenhua, ZHAO Zhongwei. The application of GMS in the analysis of two-dimensional stable seepage of wall rockfill dam [J]. Water Resources and Power, 2008,4:74-76. (in Chinese))
- [8] 谭文清,孙春,胡婧敏,等. GMS 在地下水污染质运移数值模拟预测中的应用[J]. 东北水利水电, 2008,(5). (TAN Wenqing, SUN Chun, HU Jingmin, et al. The application of GMS in the numerical simulation prediction of ground water pollution [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2008,(5). (in Chinese))
- [9] 徐乐中,陆爽君,陈重军,等. 苏州分散性农村生活污水处理工艺技术现状及适用技术优化[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2014,27(1):5-9. (XU Lezhong, LU Shuangjun, CHEN Chongjun, et al. Present status and optimization of technologies for decentralized rural domestic sewage treatment in Suzhou [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2014,27(1):5-9. (in Chinese))
- [10] 林琳,郑无喧,黄耀志. 浅析美国“蓝道”规划建设[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2016,29(1):60-66. (LIN Lin, ZHENG Wuxuan, HUANG Yaozhi. The analysis on the planning and construction of American “Blueways”[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2016,29(1):60-66. (in Chinese))
- [11] 李家科,李亚. 基于 SWMM 模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报, 2014,33(4):60-67. (LI Jiako, LI Ya. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(4):60-67. (in Chinese))
- [12] 武春芳,徐明德. 太原市迎泽湖富营养化控制的模型研究[J]. 中国环境科学, 2014,34(2):485-491. (WU Chunfang, XU Mingde. Model study on eutrophication control in Yingze lake of Taiyuan city [J]. China Environmental Science, 2014,34(2):485-491. (in Chinese))
- [13] 胡博,赵建强. 城市地表径流污染物浓度数学模型的建立及验证[J]. 环境科学学报, 2015,35(7):2261-2268. (HU Bo, ZHAO Jianqiang. Establishment and verification of a novel mathematical model for pollutant concentrations in urban rainfall runoff [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015,35(7):2261-2268. (in Chinese))
- [14] 许彦平,熊志涛. 武汉市三维水文地质建模要点研究[J]. 资源环境与工程, 2014,3:339-342. (XU Yanping, XIONG Zhitao. Key points of three-dimensional hydrogeological modeling in Wuhan [J]. Resources Environment & Engineering, 2014,3:339-342. (in Chinese))

- nese))
- [15] 杨晓华,杨志峰,祁建强,等.水文模型参数识别算法研究及展望[J]. 自然科学进展, 2006,16(6):657-66. (YANG Xiaohua, YANG Zhifeng, LI Jianqiang, et al. Research and prospects of identifiable algorithm for hydrological model parameters [J]. Progress in Natural Science, 2006,16(6):657-66. (in Chinese))
- [16] 郝振纯,谷军方,杜富慧. 随机 GP 法在概念性水文模型参数优选中的应用[J]. 中山大学学报, 2009,48(6):18-23. (HAO Zhenchun, GU Junfang, DU Fuhui. Application of stochastic GP algorithms optimization to conceptual hydrologic model parameters [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009,48(6):18-23. (in Chinese))
- [17] 周振,吴志超. 基于呼吸计量法的异养菌动力参数优化估计[J]. 中国环境科学, 2010,35(6):53-54+125. (ZHOU Zhen, WU Zhichao. Optimization estimation of kinetic parameters for heterotrophic biomass based on batch respirometric method [J]. China Environmental Science, 2010,35(6):53-54+125. (in Chinese))
- [18] 白杰,刘和,殷波,等. C/N 比跳控污泥厌氧发酵产酸的数学模型研究[J]. 中国环境科学, 2015,35(1):3303-3309. (BAI Jie, LIU He, YIN Bo, et al. Mathematical modeling of the anaerobic fermentation for VFAs production from sludge by C/N ratio regulation [J]. China Environmental Science, 2015,35(1):3303-3309. (in Chinese))
- [19] 邹宗森,施汉昌,李鑫玮. 反硝化池滤池的数值模拟与模型校正[J]. 中国环境科学, 2014,34(10):2505-2512. (ZOU Zongsen, SHI Hanchang, LI Xinwei. Simulation and model calibration of denitrification biological filter [J]. China Environmental Science, 2014,34(10):2505-2512. (in Chinese))
- [20] 王景瑞,胡立堂,尹文杰. iTOUGH2 反演模型在地下水模拟中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2015,42(1):35-41. (WANG Jingrui, HU Litang, YIN Wenjie. Application of iTOUGH2 to groundwater modeling [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015,42(1):35-41. (in Chinese))

Application of GMS Model in Hydrological and Water Quality Simulation

ZHU Junyan, LI Cuimei, HE Jingxiong, XIANG Song

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: GMS model is a widely-used system in groundwater simulation. This paper took a town in Kunshan as a study area to simulate the hydrological conditions and water quality of the groundwater using the GMS model. The conceptual and mathematical model was established with generalized method, and the main parameters of the model was calibrated with iterative method, and then MODFLOW and MT3DMS were used to simulate and forecast the hydrological condition and water quality and migration trends of pollutants in the study area. The results show that the simulated values are consistent with measured values, which means that the calibrated GMS model can better reproduce the characteristics of the underground water with strong reliability, and can be applied to simulate and forecast migration trends of pollutants in watersheds.

Key words: GMS model; hydrology and water quality; simulation; forecasting; groundwater; pollutant

(上接第 77 页)

Study on Temporal Distribution of Precipitation in Beijing City during Flood Period Based on Dynamic Cluster Analysis and Fuzzy Pattern Recognition

LIU Yuanyuan¹, WANG Yi², LIU Hongwei², DU Longgang³, LIU Shu¹, CHAI Fuxin¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Office of Flood Control and Drought Relief Headquarters of Beijing Municipal People's Government, Beijing 100038, China; 3. Beijing Hydrological Center, Beijing 100089, China)

Abstract: Dynamic cluster analysis and fuzzy pattern recognition method were used to study the spatial distribution characteristics of rain pattern and rainfall at single station, based on the 50 typical rainstorm processes in Beijing City during the flood periods in recent years. The results show that the unimodal type is mainly temporal pattern. The maximum precipitation is concentrated and the extreme value rainfall is large, which is easy to cause waterlogging. The bimodal type is seldom.

Key words: dynamic cluster analysis; fuzzy pattern recognition; characteristics of temporal pattern