

某傍河污染场地排污河与地下水水力联系模拟研究

刘丽雅, 何江涛, 王俊杰, 张 昕

(中国地质大学 水资源与环境学院 水资源与环境工程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为研究常见地表排污河对地下水造成的影响, 选择安徽省淮北市濉河某傍河区域进行研究。在对研究场地开展野外调查、抽水试验、微水试验等工作的基础上, 从水动力学角度对研究场地地下水进行系统研究。应用 Processing Modflow 建立了该研究场地的水文地质模型, 根据各均衡区间水量交换情况揭示了排污河、深浅含水层间的水力联系状况。模拟结果表明, 排污河与浅层含水层之间没有明显的水力联系; 深、浅含水层之间的水力联系微弱。

关键词: 傍河; 地表污染源; Processing Modflow; 水力联系; 水动力学

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2011)06-1201-06

Simulation Study of Hydraulic Connection Between the Polluted River and Groundwater in a Riparian Zone

LIU Li-ya, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, ZHANG Xin

(Beijing Key Laboratory of Water Resources and Environmental Engineering, School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This study specified a polluted riparian zone of Sui River, Huaibei in Anhui Province to research the effect of common surface pollutant sources on groundwater. Based on a field investigation, pumping test and slug test in the polluted riparian zone, a systemic study was carried out in respect of hydrodynamic. Processing Modflow was used to establish the hydrogeology model, we can discriminate the hydraulic connection among the polluted river, the deep aquifer and the shallow aquifer, according to the situation of water exchange among subregions. The results of simulation demonstrated that there was no obvious hydraulic connection between the polluted river and the shallow aquifer, and the hydraulic connection between the deep aquifer and the shallow aquifer was weak.

Key words: riparian zone; surface pollutant source; Processing Modflow; hydraulic connection; hydrodynamic

0 引 言

地表水与地下水的相互转化是自然界普遍存在的一种水文现象, 它是水资源的基本属性之一^[1]。国内外已经有许多学者开展了河流与含水层之间水力联系状况的研究^[2-7]。地表径流作为最常见的纳污水体, 受到污染的同时极易造成傍河区域地下水的污染^[8]。因此, 研究河流与含水层之间的

水力联系对于定量描述河水、地下水之间的相互转化关系, 实现水资源评价和污染源防治规划以及生态环境保护等方面具有十分重要的意义^[9]。

本文以安徽省淮北市濉河下游某傍河区域作为研究场地, 在野外调查、抽水试验和微水试验等工作的基础上, 应用 Processing Modflow 软件建立了该研究场地的水文地质模型, 通过模拟地下水流的运动过程以及水量分析, 查明了该研究场

收稿日期: 2011-06-02; 改回日期: 2011-09-12; 责任编辑: 戚开静。

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010634505)。

作者简介: 刘丽雅, 女, 硕士研究生, 1987年出生, 地质工程专业, 主要从事地下水环境的研究工作。

Email: lydia_lly@163.com。

通信作者: 何江涛, 男, 副教授, 1974年出生, 地下水科学与工程专业, 主要从事土壤、地下水污染控制与修复方面的研究工作。Email: jithe@cugb.edu.cn。

地排污河与浅层含水层以及深、浅含水层间的水力联系状况,为研究场地排污河对地下水的影响提供依据。

1 研究场地概况

研究场地位于安徽省淮北市濉河下游东侧的一处傍河区域,紧邻寇湾村庄。濉河主要为城市纳污河,且为季节性河流,水量受季节和人为影响较大,变化差异明显。河道淤积严重,底部有约3 m厚的淤泥,两侧修葺有河槽,河水自净能力差。在场地下游500 m处建有濉溪水闸,闸门开闭随季节而变。寇湾村是一个傍河小村,该村已经实施集中式供水,水源井(H04)深度约为30 m(图1)。

为研究排污河对傍河地下水的影响,研究场地钻孔设计如下:在河道东侧垂直河流设置一条钻孔剖面,钻孔距离排污河由近及远分别为H13、H01、H14、H15、H03;斜交于此剖面,另布设钻孔剖面H13、H16、H02。以上布置的钻孔均为浅层钻孔,钻孔深度为30 m。为了查明该场地深、浅含水层间地下水的水力联系状况,在H15钻孔西南侧5 m平行河流布设深层钻孔H17,钻孔深度为60 m。

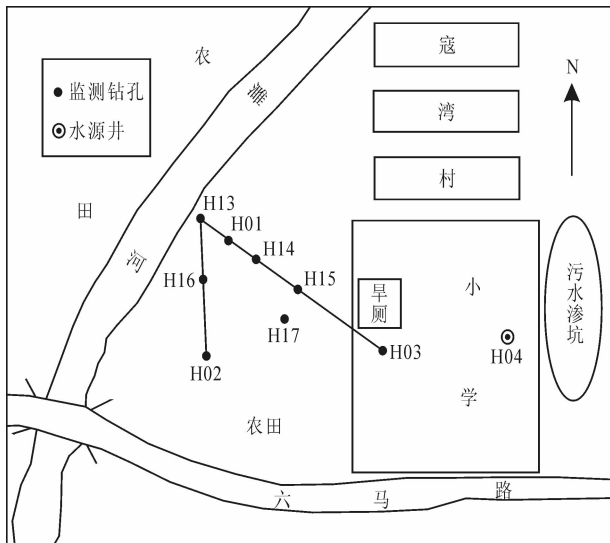


图1 研究场地示意图

Fig. 1 Schematic map of the research site

研究场地钻孔岩心编录以及当地水文地质资料显示:地表埋深65 m内主要岩性为粉砂、细砂、粉质亚粘土、粉质粘土、淤泥质粘土和粘土。可将研究场地地层结构大致概化为4层:第一层为浅层含水层,厚度约30 m,岩性主要为粉砂、细砂、粉质亚粘土和粉质粘土;第二层为弱透水

层,位于地表以下30~40 m,厚度约为10 m,岩性主要为淤泥质粘土,透水性较差,其中局部出现细砂和中砂,视为天窗;第三层为深层含水层,位于地表以下40~58 m,厚度约为18 m,岩性主要为粉砂、粉质亚粘土和粉质粘土;第四层为隔水层,位于地下埋深58 m,厚度约为7 m,岩性主要为粘土。深、浅钻孔花管位置不同,浅层钻孔抽取浅层含水层的地下水,深层钻孔H17抽取深层含水层的地下水。

2 水流模型的建立

2.1 水文地质概念模型

2.1.1 模型范围和网格剖分

研究场地范围约30 m×30 m,面积900 m²。在构建模型时,为尽量减少边界条件对模型的影响,应根据具体情况适当扩大范围。因此,本模型的长宽范围为200 m×200 m,面积40 000 m²。由于研究场地较小,要求研究精度较高,所以将模型剖分为200行×200列,即每个单元格的长宽为1 m×1 m。

2.1.2 含水层结构概化

根据研究场地钻孔岩心编录,将含水层结构分为4层,与水文地质剖面概化相一致(图2):第一层为浅层含水层,厚度约30 m,以粉砂、细砂为主;第二层为弱透层,厚度约10 m,以粘土为主,其中局部存在天窗;第三层为深层含水层,厚度约18 m,以粉砂为主;第四层为隔水层,厚度约7 m,以粘土为主。研究场地范围内地下层岩性比较单一且连续,模拟时可将每个含水层概化为非均质各向异性介质^[10]。

2.1.3 边界条件概化

研究场地地下水开采量不大,还未形成强烈的降落漏斗。通过本次抽水试验水位观测资料可知,地下水位高于河水位,地下水向河流排泄,水力梯度小,地下水径流缓慢,故将东、西边界概化为定水头边界^[11]。初始状态下的地下水等水位线基本与河流平行,故将南、北边界概化为隔水边界。地表上边界主要接受大气降水入渗补给,下边界为隔水层的底部,概化为隔水边界^[12]。

2.2 数值模型

2.2.1 时间参数的确定

根据抽水试验观测资料,将Modflow模拟时间和时间步长与实际抽水试验同步。整个模型模拟期累计4 440 min,共分60个应力期。每个应力期

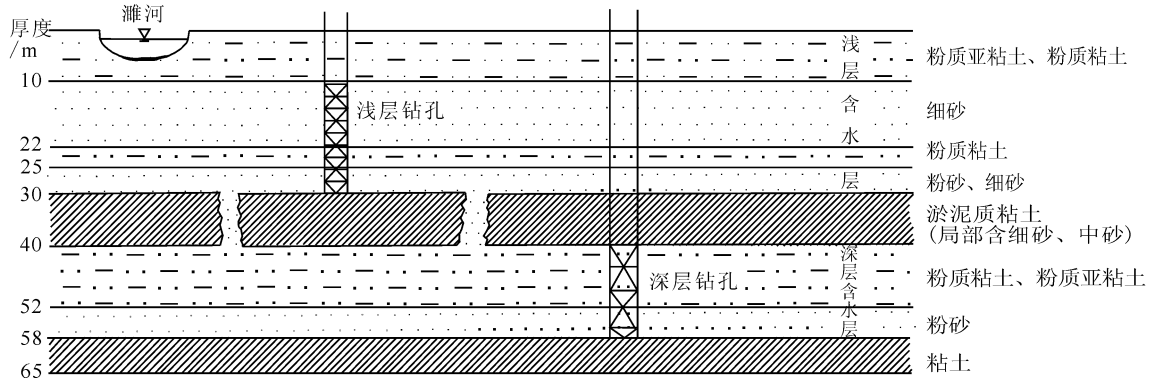


图 2 研究场地含水层结构概化图

Fig. 2 Aquifer structure map of the research site

的时间长度在 0.25 ~ 360 min 不等，抽水前期时间间隔短，抽水后期时间间隔长。时间步长及其增加因子均为 1。

2.2.2 水平渗透系数和垂直渗透系数的确定

研究场地 H01、H14、H15 和 H16 钻孔分别进行了微水试验，故其水平渗透系数可采用微水试验结果，但微水试验结果只能代表井附近小范围内的情况^[13]；其余井 (H02 和 H13) 及整个场地 (除排污河外) 的水平渗透系数均采用抽水试验的结果；排污河、第二层弱透水层和第四层隔水层的水平渗透系数根据其岩性查得经验值^[14]。第三层深层含水层的水平渗透系数采用抽水试验中 H17 深井的水文地质参数 K 值结果。综合上述，浅层含水层水平渗透系数分区情况如图 3 所示。

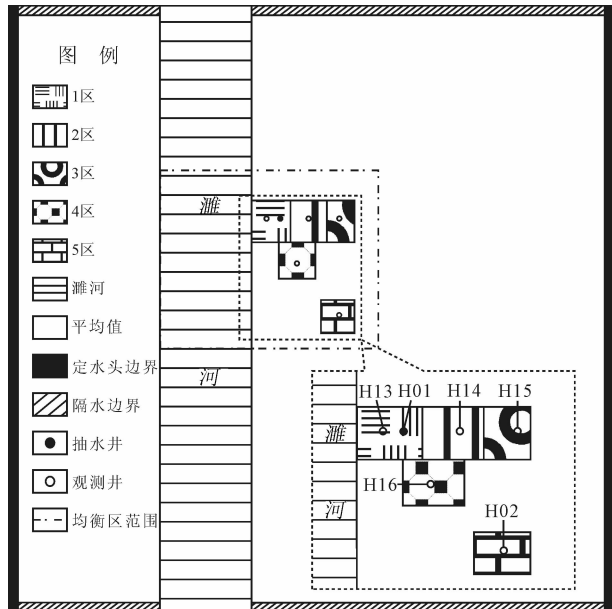


图 3 浅层含水层水平渗透系数分区图

Fig. 3 Partition map of horizontal hydraulic conductivity in the shallow aquifer

垂直渗透系数取各层水平渗透系数的 1/100。此外，第二层弱透水层局部存在天窗，天窗部分的渗透系数与上部含水层渗透系数相等。在模拟过程中为了达到较为理想的拟合结果，还需要对以上赋值的参数进行微调^[10]，具体的调参结果见表 1。

表 1 模型水平渗透系数和垂直渗透系数

Table 1 Horizontal and vertical hydraulic conductivities of the model

含水层	分区	$K_x, K_y / (m/min)$	$K_z / (m/min)$
浅层含水层	1	0.003 00	
	2	0.000 84	
	3	0.002 00	
	4	0.002 40	0.000 015
	5	0.000 23	
河流		0.015 00	
平均		0.001 50	
弱透水层	—	6.9×10^{-7} (天窗部分渗透系数 = 上部含水层渗透系数)	6.9×10^{-9} (天窗部分渗透系数 = 上部含水层渗透系数)
深层含水层	—	0.00 636	0.000 063 6
隔水层	—	6.9×10^{-7}	6.9×10^{-9}

2.2.3 河流

研究场地潍河河宽约 30 m，河底切割深度 5 ~ 6 m，河床底部有约 3 m 厚的淤泥，淤泥渗透系数经验值为 $9 \times 10^{-8} m/min$ 。河水位在抽水过程中基本保持不变，平均河水位为 28.675 m。

建立水流模型时，由于事先不清楚河流与地下水的水力联系情况，因此不能将河流概化为水头边界，而是用 River 模块去模拟河流的变化情况。River 模块所需参数包括河床底部水力传导系数、河水位以及河底高程，其中，河床底部水力传导系数计算公式为：

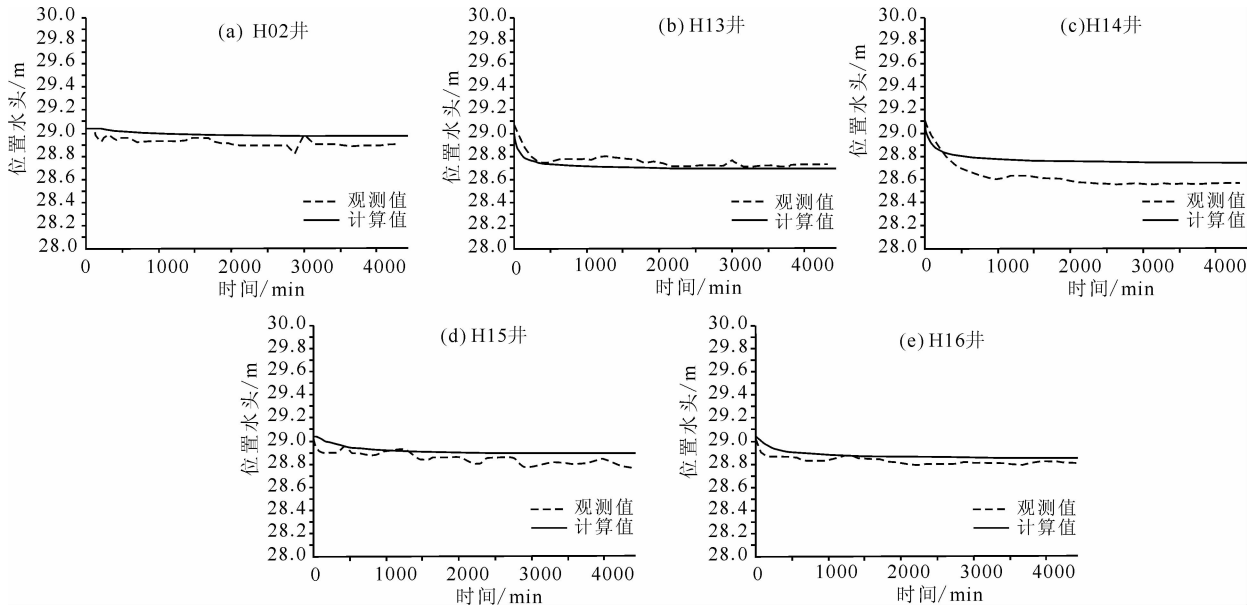


图4 观测井水位拟合曲线

Fig. 4 Head fitting curves for observation wells

$$C_{riv} = \frac{K_{riv} \cdot L \cdot W_{riv}}{M_{riv}} \quad (1)$$

式中： K_{riv} 为河底垂向渗透系数； L 为网格单元内的河道长度； W_{riv} 为网格单元内的河道宽度； M_{riv} 为河底沉积物的厚度。由公式(1)计算出河床底部水力传导系数 $C_{riv} = 3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{min}$ 。

2.2.4 抽水井和观测井

研究场地只有一个抽水井 H01(图1)，以定流量 $0.09 \text{ m}^3/\text{min}$ 抽水，累计抽水 4 440 min。观测井共 5 个(H02、H13、H14、H15 和 H16)，其水头和时间观测数据依据实际抽水试验数据逐一录入。由于主要研究浅层含水层水位变化情况，因此观测井不包括深井 H17。

2.3 观测井抽水水位拟合结果

观测井抽水过程中水位拟合曲线如图4所示。通过调试参数，使计算值尽可能与观测值重合。各观测井水位拟合曲线相对误差分别为 0.24%、0.07%、0.70%、0.34%、0.17%，符合相对误差精度要求。因此，模拟所得地下水流场与实际流场拟合较好，能够真实反映研究场地实际的水文地质情况^[15]，其计算数据能说明河流与浅层含水层以及深、浅含水层间的水力联系状况^[16]。

3 水力联系分析

3.1 均衡区的划分

为了查明排污河与浅层含水层以及深、浅含

水层间的水力联系状况，需要对模型划分均衡区，并计算出各均衡区的水量交换情况，便能定量判断它们之间水力联系的强弱。均衡区划分情况如下：浅层含水层在平面上划分出一个大小为 $70 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的均衡区 1，区内覆盖了所有监测钻孔，其西边界与排污河西边界重合(图3)。弱透水层、深层含水层和隔水层中均衡区划分的范围和位置与浅层含水层中均衡区 1 一致，分别为均衡区 2、均衡区 3 和均衡区 4(图5)。

3.2 河流与浅层含水层之间的水力联系

河流与浅层含水层之间的水力联系通过两者

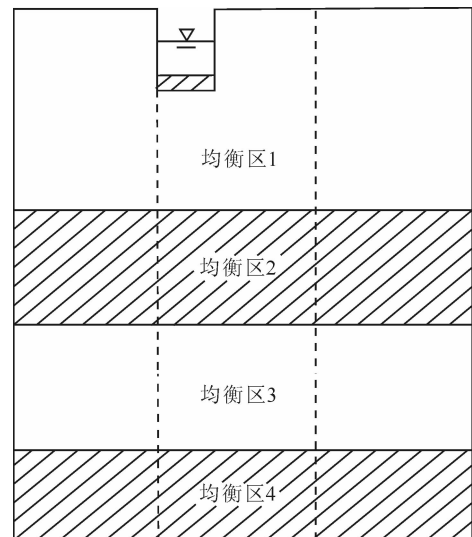


图5 含水层均衡区划分

Fig. 5 Division for subregions of the aquifers

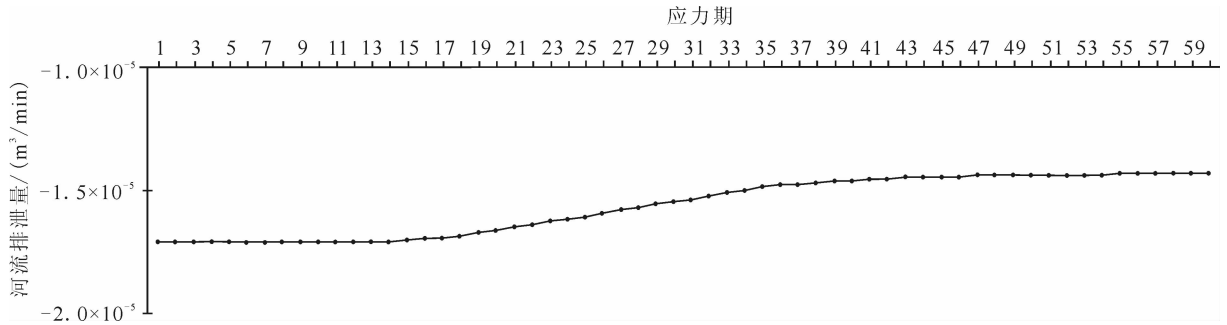


图6 各应力期的河流排泄量

Fig. 6 River leakage in each period

间的水量交换量(河流排泄量)来衡量,其计算公式^[17]为:

$$Q_{riv} = C_{riv} \cdot (H_{riv} - h) \quad (2)$$

式中: Q_{riv} 为河流与含水层之间水量交换量(河流排泄量),水流由河流流向含水层时取正值,水流由含水层流向河流时取负值; C_{riv} 为河床底部水力传导系数,其计算公式见公式(1); H_{riv} 为河水位; h 为河流附近计算单元格的地下水位。

均衡区1中每个应力期的河流排泄量如图6所示。图中,河流排泄量始终为负值,其绝对值随着抽水时间的增加而逐渐减少,但减少幅度非常小。这是由于本次抽水试验前后地下水位高于河水位,所以河流排泄量为负值,说明地下水流向河流;随着抽水时间增加,计算单元格的地下水位 h 值变小,而河水位几乎没有发生变化,所以河流排泄量的绝对值也慢慢减少,又由于地下水位下降缓慢,故河流排泄量的绝对值减少幅度非常小。综上所述,整个模型的河流排泄量很小且保持相对稳定,平均河流排泄量为 $-1.567 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{min}$,揭示了河流与浅层含水层之间没有明显的水力联系。

此外,河床底部有约3 m厚的淤泥,对河流与浅层含水层的水力联系也起到一定的阻碍作用。该研究场地的水化学分析表明,河水与浅层地下水的水化学类型截然不同,且河水特征污染物在浅层地下水中未显示出沿垂直河道迁移的现象^[8],从而进一步证实河流与浅层含水层之间没有明显的水力联系。

3.3 深、浅含水层间的水力联系

由于深、浅含水层并没有直接接触,中间夹杂着弱透水层,所以深、浅含水层间的水力联系要通过弱透水层(均衡区2)上层和下层的垂直交换量来衡量(表2)。均衡区2的上层平均垂直交换

量为 $6.638 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$,下层平均垂直交换量为 $-6.824 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$,保持在 $10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$ 数量级,揭示了深、浅含水层间存在一定的水力联系,但水力联系微弱。

表2 均衡区平均垂直交换量

Table 2 Average vertical exchange in subregions

均衡区	上层垂直交换量/(m^3/min)	下层垂直交换量/(m^3/min)
均衡区1	-	-6.638×10^{-4}
均衡区2	6.638×10^{-4}	-6.824×10^{-4}
均衡区3	6.824×10^{-4}	-1.182×10^{-8}
均衡区4	1.182×10^{-8}	-

此外,该研究场地的水化学分析表明,深、浅含水层中地下水水化学类型存在明显差异,深层地下水中各离子组分及TDS、THD明显高^[8],而由图2可知弱透水层中存在天窗,水流可能通过天窗在一定条件下发生水力联系,这也能进一步证实深、浅含水层间的水力联系微弱。

4 结论

本研究在野外抽水试验、微水试验确定水文地质参数的基础上,从水动力学角度,利用Processing Modflow软件构建水文地质模型,模拟结果与实际情况吻合,模型结果表明:

(1)观测井水位拟合曲线的拟合相对误差范围为0.07%~0.70%,均符合精度要求,模型计算出的地下水流场与实际流场拟合较好,能真实反映研究场地实际的水文地质情况,其计算数据能说明河流与浅层含水层以及深、浅含水层间的水力联系。

(2)在利用Processing Modflow软件建立的水文地质模型中,均衡区1中河流排泄量很小且保持相对稳定,平均河流排泄量为 $-1.567 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{min}$,揭示了河流与浅层含水层间没有明显的

水力联系。此外,河床底部有约3 m厚的淤泥,对河流与浅层含水层间的水力联系也起到一定的阻碍作用。

(3)均衡区2的上层平均垂直交换量为 $6.638 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$,下层平均垂直交换量为 $-6.824 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$,保持在 $10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$ 数量级,揭示了深、浅含水层间存在一定的水力联系,但水力联系微弱。此外,弱透水层中存在天窗,水流可能通过天窗在一定条件下发生水力联系,进一步证实深、浅含水层之间的水力联系微弱。

综上所述,水动力学研究结论与水化学研究结论相一致,能够进一步证实该研究场地的水力联系状况。

参考文献:

- [1] 武强,孔庆友,张自忠,等. 地表河网—地下水系统耦合模拟 I: 模型 [J]. 水利学报, 2005, 36(5): 588–592.
- [2] Perkins S P, Sophocleous M. Development of a comprehensive watershed model applied to study stream yield under drought conditions [J]. Ground Water, 1999, 37(3): 418–426.
- [3] Lu H Y, Liu T K, Chen W F, et al. Use of geochemical modeling to evaluate the hydraulic connection of aquifers: a case study from Chianan Plain, Taiwan [J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16(1): 139–154.
- [4] Kalantari N, Alizadeh B, Mohammadi A R, et al. A hydrochemical and dye-tracing investigation in the Posht-e-Naz karstic aquifer, Alburz Mountain, Northern Iran [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(1): 37–45.
- [5] 束龙仓, Chen Xun-hong. 河流—含水层系统中水文要素的变化过程分析 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(3): 251–254.
- [6] 潘世兵,王忠静,邢卫国. 河流—含水层系统数值模拟方法探讨 [J]. 水文, 2002, 22(4): 19–21.
- [7] 谭杰,王杰,杨操静. 浅谈地下水流模拟中河流的处理方法 [J]. 地下水, 2006, 28(4): 28–30.
- [8] 王俊杰,何江涛,张昕,等. 某傍河研究区的地下水化学分析 [J]. 现代地质, 2010, 24(5): 1000–1006.
- [9] 王文科,孔金玲,段磊,等. 黄河流域河水与地下水转化关系研究 [J]. 中国科学: E辑, 2004, 34(增刊 I): 23–33.
- [10] 张艳,何江涛,李鹏,等. 开封市垃圾场污染物运移模拟与控制 [J]. 地下水, 2010, 32(3): 15–18.
- [11] 涂亮,宋汉周. 基于 Visual Modflow 的黑河中游地下水流数值模拟 [J]. 勘察科学技术, 2009(2): 19–23.
- [12] 薛禹群. 地下水水动力学 [M]. 第2版. 北京: 地质出版社, 2003: 40–43.
- [13] 鞠晓明,何江涛,王俊杰,等. 抽水试验与微水试验在确定水文地质参数中的对比分析 [J]. 工程勘察, 2011(1): 51–56.
- [14] 地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队. 水文地质手册 [M]. 北京: 地质出版社, 1983: 1–532.
- [15] 边际,敦书会,司炳金. 数值模拟方法在评价地下水资源时区内河流的处理方法 [J]. 工程勘察, 1998(5): 32–34.
- [16] 杨丽,苏冬源,陈发科. 基于 Modflow 的北海涠洲岛的地下水数值模拟 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(增刊): 257–259.
- [17] 陈喜,陈淘洪. 美国 Sand Hills 地区地下水数值模拟及水量平衡分析 [J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 94–99.