

地表水地下水相互作用的地下水流动研究

丁 鹏

新疆哈密市水利局 新疆 哈密 839000

摘要:地下水是水文系统的重要组成部分,对于保护和开发日益枯竭的水资源具有重要的战略意义。因此,在本研究中,地表水和地下水被视为一个独特的系统,以便探究不同情况下地表水/地下水相互作用的水动力特性。本文利用可视模块化有限差分流动(MODFLOW)建立数值模型,通过在不同的流动边界条件和流动路径下进行分析,利用河流-含水层系统的水文模型获得地下水位波动和河流-含水层之间的流量影响机理。

关键词:相互作用,地下水模拟,河流-含水层系统

1 引言

地下水是水资源系统的重要组成部分,对流域的水文行为有重要影响。它通过与河流、湖泊和湿地的相互作用,促进了地下供水生成,并影响地表水的质量和数量^[1,2]。为了有效利用地下水资源,需要建立详细的地下水水文模型。敏感模型包含了地下水的许多参数,而地表水/地下水相互作用是相当关键的一步。相互作用影响地表水和地下水的水文行为^[3,4]。有许多关于地下水流动和地表水/地下水相互作用的数学和水文模型研究。这些研究的一个重要部分就是可视模块化有限差分流动(MODFLOW)^[5]。韩琳等人^[6]开发了一种在并行计算环境中实现的基于区域分解的装配模型,该模型允许使用全域网格细化来高效模拟大规模地下水流动和输送问题。一些人利用局部网格细化方法,确定了使用MODFLOW的优点和缺点,并通过分析地质参数研究了地表水-地下水的相互作用^[7],王仕琴等人^[8]用MODFLOW和MT3D模块研究了地下水、河流和水坝之间的复杂相互作用。

本研究旨在通过调查地面和河流之间的水动力特征来探究河流-含水层的关系。利用可视化MODFLOW技术建立了模拟地下水流的理论模型。计算了不同水头边界下的相互作用流量,讨论了河道类型对地表水/地下水相互作用的影响。

2 地表水/地下水相互作用原理

地下水可能与所有类型的地表水相互作用,如溪流、湖泊和湿地。这些相互作用不仅影响地下水水文参数,还影响湖泊、湿地和溪流中的水文、化学和生物反应。湿地中的相互作用取决于湿地的地貌位置。停滞地表水附近的相互作用波动不大。但是河流附近湿地的水位波动频繁。因此,在这些类型的湿地中,地表水/地下水的相互作用更为复杂,它极大地影响了湿地的水力和水文特征。溪流可能以不同的形式与地下水相互作用。溪流要么从地下水中

供水(增加水流),要么向地下水中释放水流(减少水流)。水流方向可以根据地面和水面的水位频繁变化。

相互作用速率不平衡的主要原因是河流流速、河流的流动路径、地下水的渗流和水头边界。相互作用还影响含水层和河流之间的浓度分布和交换。因此,地表水和地下水模型的整合在污染物迁移和浓度研究中也起着至关重要的作用。河流和湿地附近的地表水和地下水之间的相互作用如图1所示。

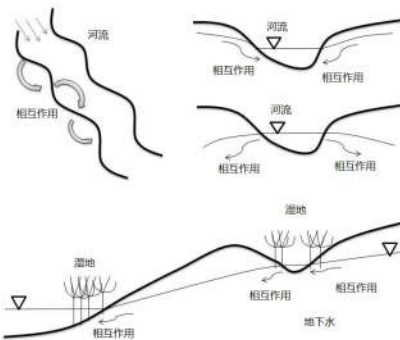


图1 溪流和湿地中地表水/地下水的相互作用

3 模型开发

3.1 可视化MODFLOW模型

可视化MODFLOW通过有限差分数值方法计算三维地下水流动。对于地下水流动和污染物输送的应用来说,拥有较为完整和用户友好的建模环境。含水层的三维模型,其特征是含水层参数,如导水率、孔隙率和单位储存量,这可以使用MODFLOW创建。MODFLOW求解恒定和可变水头边界下的地下水流量和地下水位分布。它可以选择使用河流水位作为边界,并通过连续饱和区求解相互作用率。计算地下水流量的公式如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right\} + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

其中 K_{xx} 、 K_{yy} 和 K_{zz} 为x、y、z方向的导水率(cm/s),

h 为水头(m), W 为横向流($W > 0$ 表示流入, $W < 0$ 表示流出), S_s 为单位储水量(1/m), t 为时间。

3.2 河流-含水层模型

地下水和河流可能有不同的水位高度, 这些水位高度之间的差异决定了水流方向和相互作用的速率。在研究的这一部分, 通过使用不同的水头边界来检查不同的水位条件来进行分析。选择了四种不同的边界情况, 如图2所示。从这个图也可以看出互动的方向。不同的水头边界被分配给具有单向流径的简单流和具有支流的复杂流。这些模型如图3所示。

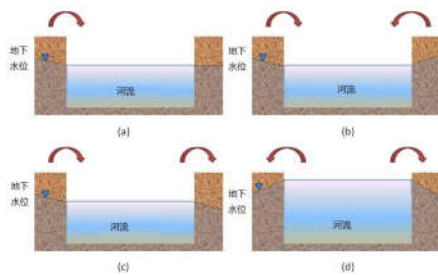


图2 不同水头边界的渗流模式

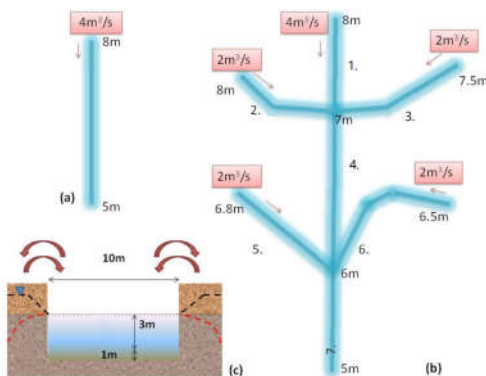


图3 流动路径: (a)具有单向流动路径的简单流, (b)具有支流的复杂流, (c)流动横截面

3.3 含水层状况

选定的河流类型位于各向同性单层含水层中, 该含水层厚度为10米, 长度为2000米, 宽度为2000米。含水层区域划分为 20×20 网格线(x 、 y 方向)。含水层参数是针对粉质粘土土壤类型定义的。表1给出了含水层参数, 图4显示了计算模型。

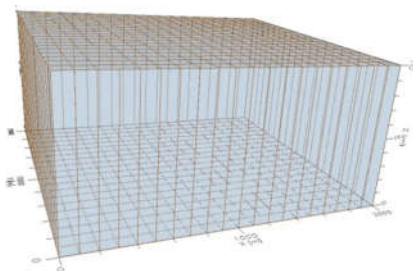


图4 计算模型

表1 含水层参数

参数	值
导水率	1.83×10^{-4}
单位储水量	1×10^{-5}
给水度	0.2
有效孔隙率	0.23
总孔隙率	0.501

4 结果和讨论

4.1 单向流径的简单流相互作用

沿河确定了从8 m到5 m逐渐减小的水头边界。水深选择为3米, 河床和含水层之间的过渡区为1米。河流上游的恒定流速为 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在图2的4种不同的地下水水头边界条件下进行分析, 结果如图5所示。

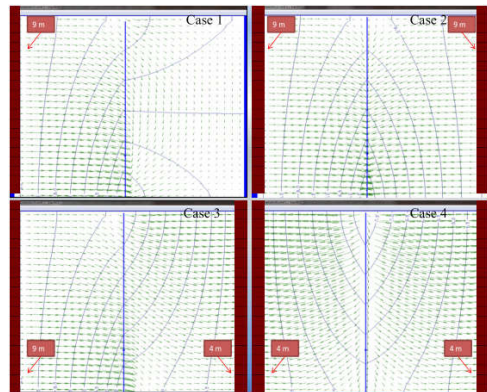


图5 不同水头边界条件下简单流的地下水流和地下水位分布

在第一种情况下, 在河流左侧定义了9 m的恒定水头边界。在第二种情况下, 地下水在河流两侧具有9 m水头边界条件。第三种情况, 地下水水头边界分别为河流左右两侧9 m和4 m。在第四种情况下, 地下水在河流两侧具有4 m水头边界条件。这些值是根据河流的水力水头选择的。从图4可以看出, 地下水按照预期从高水头边界流向低水头边界。绿色箭头表示地下水速度矢量。水流在水头差异小的区域很慢。随着地下水和河流的落差增大, 箭头变得越来越大, 密度也越来越大, 这意味着这些地区的地下水流速更高。四种不同水头边界情况下的相互作用流量如图6所示。

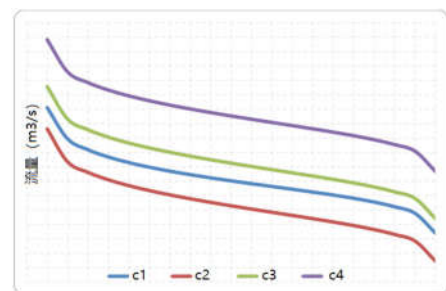


图6 简单流的地表水/地下水相互作用流量

在该图中，正流速值表示水从河流流向含水层，负流速值表示水从含水层流向河流。结果表明，从河流到含水层的最高流量出现在第四种情况下，即河流两侧定义的边界条件低于河流的水力水头。从含水层到河流的最高流量出现在第二种情况下，即河流两侧的边界条件高于河流的水力水头。在第1和第3种情况下，相互作用率小于第1和第4种情况。在两个方向上，相互作用流速约为 $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 。从该图可以看出，水头差异直接影响交互的速率和方向。此外，相互作用发生的河道长度随着可变水头差而变化。在地下水位低于河流的情况下，随着河流和含水层之间水头差的增加，河流和含水层之间的相互作用速率也增加，在地下水位高于河流的情况下，随着河流和含水层之间的水头差增加，含水层与河流之间的相互作用速率也增加，含水层与河流之间发生相互作用流量的相互作用路径变长。如果河流一侧的边界条件较高，而另一侧的边界条件低于河流水位，则水头差较高一侧的相互作用占主导地位。

4.2 带有支流的复杂流相互作用

主河道和支流的参数见表2。与第一组分析中相同的一组边界条件被集成到模型中，结果如图7所示。从该图中可以看出，支流对地下水流动有显著影响，从而对相互作用行为有显著影响。在水头差较高的地区，地表水与地下水的相互作用率也较高。在河流-含水层区域的一些地方，由于支流和主河道之间的落差，可以观察到一些位于支流和主河道区域之间的停滞点影响交互的行为。地表水和地下水的相互作用在支流周围有明显的影响，这些影响随着水头差的增加而增加。

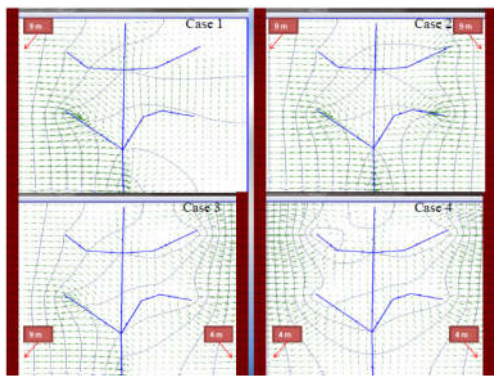


图7 不同水头边界条件下复杂支流的地下水水流和地下水位分布

表2 有支流的复杂河流的流动参数

分段	数据点	水位 (m)	河床顶部 标高(m)	河床底部 标高(m)	溪流宽度(m)	上游流量(m^3/s)
1.段	上游	8	5	4	10	4
	下游	7	4	3	10	-

续表:

分段	数据点	水位 (m)	河床顶部 标高(m)	河床底部 标高(m)	溪流宽度(m)	上游流量(m^3/s)
2.段	上游	8	5	4	10	2
	下游	7	4	3	10	-
3.段	上游	7.5	4.5	3.5	10	2
	下游	7	4	3	10	-
4.段	上游	7	4	3	10	-
	下游	6	3	2	10	-
5.段	上游	6.8	3.8	2.8	10	2
	下游	6	3	2	10	-
6.段	上游	6.5	3.5	2.5	10	2
	下游	6	3	2	10	-
7.段	上游	6	3	2	10	-
	下游	5	2	1	10	-

图8显示了四种不同水头边界条件下主河道和含水层之间的相互作用流量。从该图中可以看出，对于所有情况，曲线都具有相同的特性。在河流的上游部分，水从河流流向含水层，而对于河流的其余部分，相互作用的速度是相反的。可以发现，相互作用流速有两个峰值。这些峰值可能归因于支流与主流的交汇处。而且河流上部的其余支流以更大的角度连接到主河道，这可能是下游流量更高的原因。在两个方向上，除了在相互作用速率增加到 $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 的峰值点之外，相互作用流速率都在 $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 的数量级。

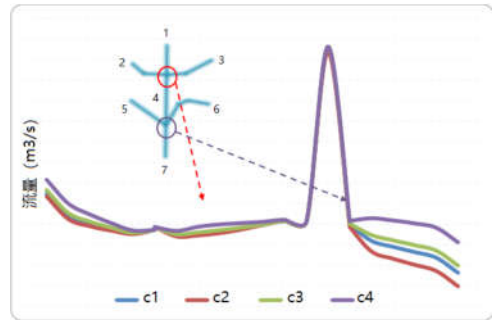


图8 复杂河流的地表水/地下水相互作用流量

4.3 不同流动路径的溪流对地表水/地下水相互作用的影响

地下水位的初始条件被定义为5m， $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流速通过主流。不同流径条件下获得的地下水位等值线和地下水速度分布如图9所示。在河流的上游区域，水从河流流向含水层，并在每个模型的下游点返回主河道。特别是，地表水/地下水的相互作用在蜿蜒型河流和有支流的复杂河流中更为明显。对于有支流的复杂河流，水从主河道流向支流。支流与主河道交汇处的水流分布不清楚，在这些区域观察到较高的相互作用率。对于蜿蜒型河流，

通过地下水位和地下水速度分布可以观察到相互作用，在河流的弯曲部分，地下水的流速越来越大，导致这些区域的相互作用速率更高。

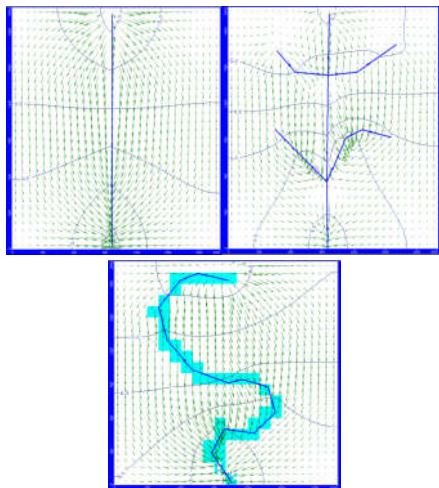


图9 地下水流和地下水位分布，(a)具有单向流径的简单溪流，(b)具有支流的复杂溪流，(c)蜿蜒型溪流。

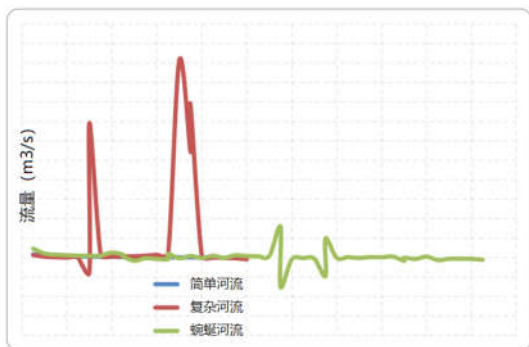


图10 第三组分析的地表水/地下水相互作用流量。

图10显示了每个流动路径的相互作用流速。如图所示，流动路径显著影响相互作用速率。在单向流径的简单流中，相互作用流率最小，而在复杂流模型中，相互作用更有效。支流决定相互作用方向和地下水位分布。可以看出，相互作用速率在主流连接处具有极值。在蜿蜒型水流模型中，相互作用流速波动。经常。沿河曲线的长度和宽度影响交互作用的程度和范围。

结束语

本研究利用可视模块化有限差分流动(MODFLOW)建立了一个河流-含水层模型，并得出以下结论。

(1) 水头边界影响相互作用的方向。当河流与含水层的水头差增大时，地下水和相互作用流量也增大。

(2) 支流对相互作用和地下水流动具有至关重要的作用。含水层和河流之间的交互流量主要发生在支流周围。相互作用速率高于在具有单向流动路径的简单流的情况。

(3) 流动路径对相互作用和地下水流动有着显著的影响。当流动路径有支流和弯曲时，相互作用行为更加复杂。这些模型中的交互率也高于简单流模型中的交互率。

参考文献:

- [1] 朱金峰,刘悦忆,章树安,郑航.地表水与地下水相互作用研究进展[J].中国环境科学,2017,37(08):3002-3010.
- [2] 吴剑锋,朱学愚.由MODFLOW浅谈地下水数值模拟软件的发展趋势[J].工程勘察,2000(02):12-15.
- [3] 郝治福,康绍忠.地下水系统数值模拟的研究现状和发展趋势[J].水利水电科技进展,2006(01):77-81.
- [4] 初京刚,张弛,周惠成.SWAT与MODFLOW模型耦合的接口及框架结构研究及应用[J].地理科学进展,2011,30(03):335-342.
- [5] 韩琳,颜翠翠,赵振伟,吴婧,马鹏飞.基于Visual MODFLOW的地下水数值模拟研究及水位预测[J].山东国土资源,2021,37(03):67-74.
- [6] 严芳芳.Visual Modflow在水资源论证中的应用探讨[J].山东水利,2021,No.270(05):44-45.
- [7] 高锐,张耀坤,陈振源,许川.基于MODFLOW模型的MATLAB/SIMULINK 地下水位控制仿真系统——以骆驼城为例[J].干旱区资源与环境,2020,v.34; No.260(04):107-115.
- [8] 王仕琴,邵景力,宋献方,张永波,周小元,霍志彬.地下水模型MODFLOW和GIS在华北平原地下水资源评价中的应用[J].地理研究,2007(05):975-983.