

doi:10.3799/dqkx.2012.028

盆地地下水流模式及其转化与控制因素

梁杏¹, 牛宏², 张人权², 刘彦², 靳孟贵¹

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: Tóth(1963)在复杂盆地给定上边界水头条件下,推演出多级次地下水流系统.运用此方法探讨水流模式,改变盆地介质或盆地深度等条件,盆地水均衡会同步发生变化;同时,给定上边界水头也固化了盆地的势源与势汇的位置与数目,这与实际条件不相符合,也限制了地下水流模式的转化研究.在总结实验条件下多级水流系统特征的基础上,提出了通量上边界的地下水流系统模拟方法(简称 CUG-GWFS 方法),并进行了水流系统数值模拟.结果表明:(1)在多个可能势汇的盆地中,可以发育5种地下水流模式,即:简单区域水流系统(RS)、局部+区域两级嵌套水流系统(LS+RS)、局部+中间+区域三级嵌套水流系统(LS+MS+RS)、局部+中间两级嵌套水流系统(LS+MS)和简单局部水流系统(LS).(2)盆地地下水流模式受盆地入渗强度、介质条件、盆地长度与深度比值,以及盆地可能势汇的多少与位置的影响.(3)保持其他条件不变,单独加大盆地入渗强度比 R_{ic} ,或加大盆地长深比 R_{ld} ,盆地水流模式按照上述5种模式呈现有序转化.

关键词: 地下水流模式;转化;入渗强度比;长深比;水文地质.

中图分类号: X141

文章编号: 1000-2383(2012)02-0269-07

收稿日期: 2011-09-20

Basinal Groundwater Flow Patterns and Their Transformation and Dominant Factors

LIANG Xing¹, NIU Hong², ZHANG Ren-quan², LIU Yan², JIN Meng-gui¹

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Tóth proposed hierarchical groundwater flow-systems in the complex basin based on given head upper-boundaries in the 1960's. However, when the flow patterns with the given head upper-boundary are dealt with (so called Tóth method), changes of hydraulic conductivities or basin geometry result in changes of water budget in a basin synchronously. At the same time, the number of potential sources and sinks and their positions are fixed by the given head upper-boundaries which are not consistent with the actual condition and may result in wrong groundwater flow patterns and their transformation. Based on summarizing the hierarchical characteristics of groundwater flow systems on sand-box experiments, we propose a numerical simulation of groundwater flow patterns using flux as upper-boundaries (so called CUG-GWFS method). The simulated results show that five sequential flow patterns may develop in the basin with several possible potential sources and sinks: (a) simple regional only, (b) nested local-regional, (c) nested local-intermediate-regional, (d) nested local-intermediate, and (e) just local flow systems. The basinal groundwater flow patterns are dominated by the infiltration intensity, hydraulic conductivities, the ratio of length to depth and the number of potential sources and sinks and their positions. The basinal flow patterns will transform orderly as the five patterns above with the increasing of the ratio of infiltration intensity to hydraulic conductivity R_{ic} or the ratio of length to depth of a basin R_{ld} while the rest conditions remain the same.

Key words: groundwater flow pattern; transformation; ratio of infiltration intensity to hydraulic conductivity; ratio of length to depth; hydrogeology.

Tóth(1963)在复杂盆地给定水头上边界条件(简称 Tóth 方法)下,提出了多级次地下水流系统理论;随后,许多学者在 Tóth 方法的基础上,探讨与总结地下水流系统特征(Tóth, 1999, 2009;

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973 计划”(No. 2010CB428802); 中国地质调查局计划项目专题(No. 12120733908).

作者简介: 梁杏(1958-),女,教授,从事地下水流系统理论与工程水文地质方向的教学科研工作. E-mail: xliang@cug.edu.cn

Eötvös Loránd University, 2008). 其中,通过改变给定水头条件(Tóth, 1963, 1980; Engelen and Jones, 1986; Zijl, 1999)、介质场特征(Freeze and Witherspoon, 1966, 1967; Engelen and Kloosterman, 1996; Jiang *et al.*, 2009, 2010; 刘宇和贾静, 2009)和盆地深度(Engelen and Jones, 1986; Engelen and Kloosterman, 1996)等因素下,给出地下水流系统可以从复杂的三级局部+中间+区域系统(LS+MS+RS)向两级局部+中间系统(LS+MS),再向一级局部(LS)水流系统的转化. 然而, Tóth 方法在探讨盆地介质或盆地深度等变化下,盆地水均衡会同步发生变化;给定水头上边界也固化了盆地势汇的位置与数目. 这些既与实际潜水盆地水流条件不相符,也限制了地下水流特征、模式的转化研究. 2008 年我们研制了地下水流系统演示仪,在实验模拟时(Liang *et al.*, 2010; 刘彦等, 2010)发现,该演示仪不仅能够通过砂槽物理实验再现 Tóth 提出的多级地下水流系统,而且可以采用给定通量上边界的实验模拟揭示盆地地下水流模式与转化规律. 本文在总结 Tóth 方法的基础上,结合物理实验与数值模拟,系统分析地下水流模式、模式转化与控制因素.

1 Tóth 的盆地多级次地下水流理论与模式

1963 年 Tóth 在复杂盆地给定上边界水头条件下,推演盆地发育多级次地下水流系统,即潜水盆地能够发育局部的+中间的+区域的三级嵌套式地下水流系统,后被水文地质界称为地下水流系统理论(也称地下水流动系统理论).

1.1 Tóth 水流系统数学模型

根据“水流连续性原理”,Tóth(1963)建立了潜水盆地理论水流二维数学模型,盆地模型如图 1. 为方便数学模型的求解(解析解),Tóth 给定了以下条件:

(1)盆地规模不大(模型长度 s 与深度 z 之比不大),即小型潜水盆地,盆地介质均质各向同性;(2)盆地两侧边界为分水岭,概化为理论不透水边界(隔水边界),盆地底部为水平不透水边界;(3)在盆地地表起伏不大时,定义潜水面与地面起伏相似,在数学模型中将潜水面简化成一条倾斜的正弦曲线,即给定水头上边界,水位方程表达式给定为:

$$Z = Z_0 + x \tan \alpha + a \frac{\sin(bx/\cos \alpha)}{\cos \alpha}, \quad (1)$$

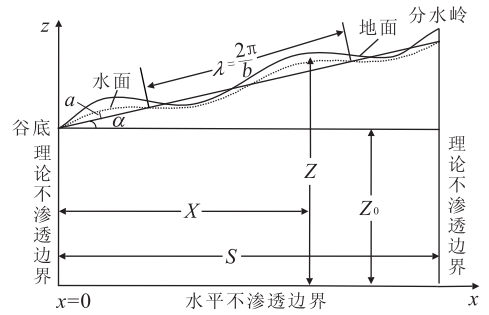


图 1 小型潜水盆地二维剖面数学模型图示(Tóth, 1963)
Fig. 1 Idealized cross-section of a drainage basin's valley flank of the sinusoidal water table

式中: Z_0 为常数,表示谷底到盆地底部不透水边界的深度; a 代表模型盆地谷翼的平均坡度; a, b 分别为余弦曲线的幅度和频率;(4)盆地最低处为地表水体或河流出口(谷底).

在上述约束条件下,盆地即可形成稳定二维流动,用拉普拉斯方程表示:

$$\partial^2 \phi / \partial x^2 + \partial^2 \phi / \partial z^2 = 0, \phi \text{ 表示流体势能.} \quad (2)$$

由方程(2)和二维模型边界条件,设定盆地长度为 s ,推导出水头解析解:

$$\phi = g \left\{ Z_0 + \frac{\tan \alpha \times S}{2} + \frac{a}{b \times S} \left(1 - \cos \frac{bS}{\cos \alpha} \right) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{S^2 ab \left(1 - \cos \frac{bS}{\cos \alpha} \cos m\pi \right)}{S^2 b^2 - m^2 \pi^2 \cos^2 \alpha} + \frac{\tan^2 \alpha \times S^2}{m^2 \pi^2} (\cos m\pi - 1) \right] \times \frac{\cos(m\pi x/S) \cosh(m\pi z/S)}{s \times \cosh(m\pi z_0/S)} \right\}. \quad (3)$$

根据势函数与流函数的关系,即可获得上述盆地模型的二维流网图.

1.2 Tóth 模型多级次地下水流系统解析结果

Tóth(1963)利用上述数学模型,取盆地深度 10 000 ft(相当于 3 047.85 m, 1 m=3.281 ft),长度 20 000 ft(相当于 6 095.7 m);上部水头边界条件的余弦函数振幅 $a=50$ ft(相当于 15.2 m),斜率 $\alpha=0.02$,利用公式(1)计算出存在 5 个高地势和 5 个低地势的波状上边界(Tóth 称为理论地形势),绘制了盆地多级次地下水流系统图(图 2).

Tóth 将图 2 得出的复杂地形势潜水盆地多级次(嵌套式)地下水流系统,定义为局部的(LS)+中间的(MS)+区域的(RS)地下水流系统(Tóth, 1963, 1980).

1.3 Tóth 模型地下水流模式的转化与局限

在 Tóth 模型条件下,给定盆地的复杂地形势,也称为给定水头上边界模型,地下水流系统(模式)

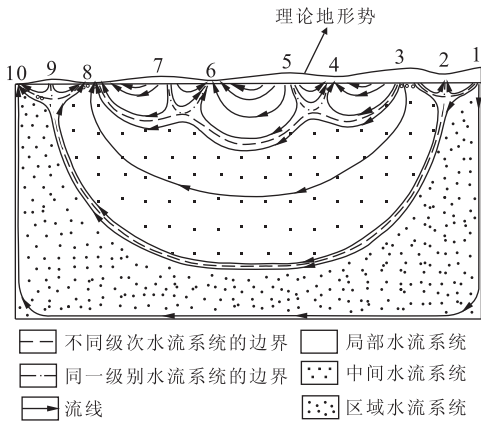


图2 均质各向同性潜水盆地地下水流系统(Tóth, 1963;理论地形势垂向放大)

Fig. 2 Theoretical flow pattern and boundaries between different flow systems

图中1、3、5、7、9代表地形势源区;2、4、6、8、10代表地形势汇区

的变化受“理论地形势”的波幅(a)、斜率(c)、盆地深度的影响(Tóth, 1963, 1980),以及介质渗透性与非均质性的影响(受篇幅限制,相关结果图请读者参见文献)。

(1)Tóth(1963)、Engelen and Jones(1986)研究得出,盆地长度和深度不变,复杂的理论地形势条件下(给定水头上边界):①地下水流模式随“理论地形势”波幅增大,盆地由发育区域系统(RS)+中间系统(MS)+局部系统(LS)三级,转化为中间系统(MS)+局部系统(LS)二级,再到仅有一级的局部系统(LS);“理论地形势”斜率加大的结果,地下水流模式的变化与波幅变化相同。②随盆地深度减小(或盆地长度的加大),盆地从发育RS+MS+LS三级系统,转化为MS+LS二级,再到仅有一级的LS地下水流模式。③如果为简单盆地,即理论地形势为单增斜线,地下水流系统只发育一级区域系统。

(2)Zijl(1999)进行了多波长叠置水头分布(潜水面)与盆地隔水层分布位置的研究,得出在多波长水头分布(相当于更为复杂的地形势)下,盆地地下边界隔水岩层分布由浅到深(相当于盆地深度加大)的地下水流系统特征。盆地浅,长波影响较小,盆地只发育局部系统;一定深度时,长波影响加大,盆地发育三级水流系统;继续加大盆地深度,长波影响减弱,系统模式不变。Zijl的研究与Tóth的“理论地形势”叠加盆地深度的变化对水流模式转化的影响结论一致。

(3)介质渗透性与非均值的影响结果:①Freeze and Witherspoon(1966, 1967, 1968)系统进行了简

单与复杂盆地介质场非均质性的模拟;在盆地地下水流发育三级系统条件下,分析改变介质的非均质性对系统模式变化的影响。在盆地下部置入一层高渗透性介质(加大100倍),发育RS+MS+LS三级系统的盆地,将会转化为发育RS+LS二级模式;盆地下部置入一高渗透性透镜体,地下水流系统特征变化相同。②考虑到实际沉积盆地以及岩体渗透性特征随深度减小的规律,Jiang *et al.* (2009)进行了渗透系数随深度指数衰减的盆地地下水流系统模拟。渗透系数随深度指数衰减程度由小到大,盆地发育的RS+MS+LS三级系统将会转化为MS+LS二级水流模式,但作者没有继续加大渗透系数的衰减强度模拟,只得到到渗透系数随深度衰减将影响系统模式的结论。

以上对地下水流系统的模拟与分析都以Tóth的给定水头上边界模型为基础,以下简称Tóth方法。Tóth方法不仅提出了复杂地下水流系统模式,并指出地下水流模式受上边界水头分布特征、盆地深度和介质的影响。然而,在给定水头上边界情况下,探讨盆地深度和介质变化的影响模拟时,盆地地下水均衡条件随之发生了改变,此时,无论是讨论盆地深度还是盆地介质对地下水流的影响,实质上是多因素变化的共同结果。也就是说Tóth给定水头上边界的方法在揭示盆地地下水流模式及其转化规律时还存在一定局限。

2 盆地地下水流系统的实验研究

2.1 地下水流系统演示仪与实验方法

梁杏等(2008)针对Tóth多级水流系统理论,发明了一种多级次地下水流系统演示仪,以物理实验方法再现了Tóth三级地下水流系统。多级次地下水流系统模型为充填均匀细砂的长方形槽体,与降水系统(补给源)、多点势汇系统、示踪与观测系统共同构成模拟装置(装置图可参见刘彦等,2010)。

地下水流系统演示仪与Tóth模型方法的不同:实验仪器用均匀降水装置代替了Tóth方法的给定水头,更符合实际潜水盆地潜水面的形成条件;用多点势汇(不同高度的河谷)代替规则波状潜水面给定的波谷势汇(与波峰补给面积相等),实验仪器的势汇在潜水面的变化下,可能成为地下水流的实际排泄点。梁杏等(2008)提出的多级次地下水流系统模型是以通量上边界开展的地下水流系统研究的实验方法。

2009 年以来,中国地质大学地下水系统研究组,提出了采用通量上边界方法(以下简称 CUG-GWFS 方法)进行地下水流模式的研究。

2.2 改变降水入渗强度的实验结果

刘彦等(2010)进行了改变入渗强度的地下水流模拟实验,在地下水流系统演示仪下,通过改变降雨入渗强度,得到地下水流系统的 3 种变化规律。

实验研究表明:①盆地降水入渗强度很小时,只有一个最低的势汇排泄地下水;随降水入渗强度增大,盆地更多的势汇成为地下水的排泄点,直至全部河谷低地都成为实际排泄点。②随降水入渗强度加大,潜水面抬升,更多低地成为地下水流排泄点,潜水面呈现波状复杂面,接近 Tóth 复杂“地形势”条件。③随降水入渗强度由小到大,实验盆地由发育简单区域系统(RS)到发育局部+区域两级系统(LS+RS),再到发育局部+中间+区域三级系统(LS+MS+RS)。

3 通量上边界的地下水流系统数值模拟

CUG-GWFS 方法的实验研究得出了与 Tóth 方法不同的 3 种水流模式,同时给出了 3 种水流模式的转化特征。然而,受到实验仪器大小,以及填充介质的限制,利用地下水流系统演示仪,很难进一步深入开展地下水流系统与其他控制因素的研究。为此,我们采用数值模拟方法,开展了通量上边界的地下水流系统模拟。

3.1 通量上边界的数学模型概化

盆地数值模拟模型,与 Tóth 模型概化相近的是,定义矩形盆地,左右与下边界为隔水边界;不同的是上边界定为均匀补给入渗(用入渗强度表示),设定 3 个不同高度的河谷低地构成可能势汇区,在稳定流条件下,潜水面能够自然形成(计算出来)。盆地基本特征与势汇概化如图 3。盆地模型为均质各向同性介质,渗透系数取值大致维持在砂性土层渗透系数的范围内,有效孔隙度取 0.30。数值模拟研究探讨入渗强度 ϵ 、介质渗透系数 K 、盆地长度(或深度)变化对地下水流系统发育特征的影响。我们将上述 4 因子的影响分为 2 种概化模型,其中 A 类探讨入渗强度 ϵ 和渗透系数 K 的影响, B 类探讨盆地几何特征,即长度(或深度)的影响。

为便于模拟分析,盆地模型大小设为 $500 \text{ m} \times$

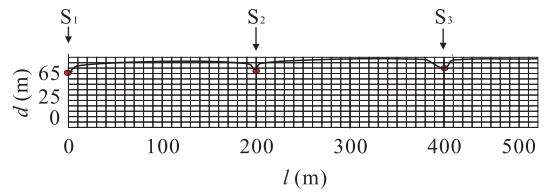


图 3 A 类模型概化及势汇分布

Fig. 3 Model generalization, discretization and distribution of potential sinks for Model A

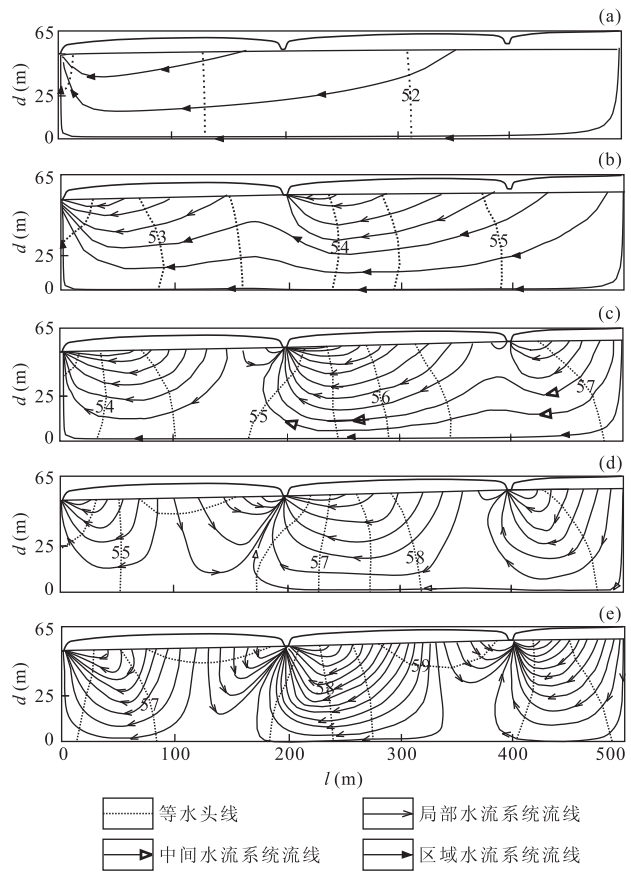


图 4 一组改变入渗强度 ϵ 的盆地地下水流模式

Fig. 4 Groundwater flow patterns for different infiltration intensities

a. $\epsilon=0.05 \text{ mm/d}$; b. $\epsilon=0.2 \text{ mm/d}$; c. $\epsilon=0.5 \text{ mm/d}$; d. $\epsilon=1 \text{ mm/d}$; e. $\epsilon=1.25 \text{ mm/d}$

65 m. A 类模型,取左下角为直角坐标的原点,设长度为 x 轴,深度为 z 轴;盆地 3 个河谷(S_1 、 S_2 和 S_3)依次构成盆地由强到弱的可能势汇,位置坐标分别为 $S_1(0, 50)$, $S_2(200, 53)$ 和 $S_3(400, 56)$. B 类模型在加深盆地深度(或增大盆地长度)时,保持 3 个河谷势汇从模型顶面计算的相对高度不变. A 类模型概化如图 3。

利用 Visual MODFLOW 软件对模型进行剖分:(1)沿盆地 x 轴每 10 m 为一列,分均 50 列;沿 z

表 1 不同入渗强度比 R_{ic} 的地下水流模拟结果

Table 1 Simulated results for different ratios of infiltration intensity to hydraulic conductivity

	A 类 I 组		A 类 II 组		$R_{ic}(10^{-3})$	地下水流模式
	渗透系数 $K(m/d)$	入渗强度 $\epsilon(mm/d)$	渗透系数 $K(m/d)$	入渗强度 $\epsilon(mm/d)$		
A I -a	0.1	0.05	A II -a	1.00	0.5	一级 RS
A I -b	0.1	0.20	A II -b	0.25	0.5	二级 RS+LS
A I -c	0.1	0.50	A II -c	0.10	0.5	三级 RS+MS+LS
A I -d	0.1	1.00	A II -d	0.05	0.5	二级 MS+LS
A I -e	0.1	1.25	A II -e	0.04	0.5	一级 LS

注:模拟的盆地长度与深度之比为 10; $R_{ic} = \epsilon/k$

表 2 逐渐减小盆地深度的地下水流模拟结果

Table 2 Simulated results for different ratios of basin length to depth

B 类	长度 $l(m)$	深度 $d(m)$	S_1 坐标 (x, z)	S_2 坐标 (x, z)	S_3 坐标 (x, z)	R_{ld}	地下水流模式
B-a	500	515	(0,500)	(200,503)	(400,506)	1	一级 RS
B-b	500	140	(0,125)	(200,128)	(400,131)	4	二级 RS+LS
B-c	500	65	(0,50)	(200,53)	(400,56)	10	三级 RS+MS+LS
B-d	500	40	(0,25)	(200,28)	(400,31)	20	二级 MS+LS
B-e	500	35	(0,20)	(200,23)	(400,26)	25	一级 LS

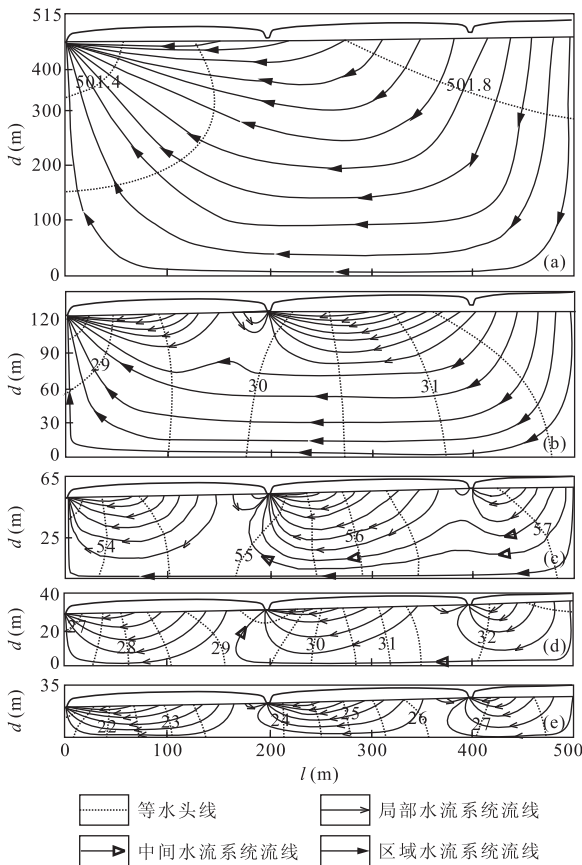


图 5 一组改变入盆地深度 d 的盆地地下水流模式

Fig. 5 Groundwater flow patterns under different basin depths
a. 等水头线取水头差 0.2, 且垂向比例显示减小了一倍; b~e 为等水头线取水头差 0.5; a. $R_{ld} = 1$; b. $R_{ld} = 4$; c. $R_{ld} = 10$; d. $R_{ld} = 20$; e. $R_{ld} = 25$

轴每 5 m 剖分一行,均分 13 行;(2)在盆地 3 个可能势汇网格区进行了加密,对 3 个排泄点所处位置,按照 1 m 间隔,对应的 x 轴方向加密 3 行, z 轴方向加密 4 列。

3.2 改变入渗强度比 R_{ic} 的地下水流模式与转化

为探讨入渗强度、盆地介质(渗透性)对地下水流系统的影响,我们设计了两组模拟方案,一组其他条件不变单独改变入渗强度 ϵ ,另一组改变介质的渗透系数 K 。

改变入渗强度的模拟发现,当盆地入渗强度 ϵ 由小变大(变化区间为 0.05~1.25 mm/d)时,盆地发育五类地下水流系统(图 4),即:简单区域水流系统(RS)、局部+区域两级嵌套水流系统(LS+RS)、局部+中间+区域三级嵌套水流系统(LS+MS+RS)、局部+中间两级嵌套水流系统(LS+MS)和简单局部水流系统(LS)。而单独改变介质的渗透系数 K ,令 K 由大到小(变化区间为 1~0.04 m/d)时,盆地同样出现上述 5 种模式的变化。

通过反复模拟对比分析,发现入渗强度与渗透系数相互反向影响着地下水流模式,表 1 是改变 ϵ 和改变 K 的两组模拟参数与结果,即 ϵ 增大或 K 减小但两者的比值相同时,地下水流模式相同。因此,可以将 ϵ 与 K 之比定义为入渗强度比(R_{ic}),综合表示入渗强度和渗透系数对地下水流模式的影响。

3.3 改变长深比 R_{ld} 的地下水流模式与转化

探讨矩形盆地几何形态的影响,可以用盆地长度和深度变化进行模拟比较。引入长深比 R_{ld} ,即盆

表 3 入渗强度比 R_{ic} × 长深比 R_{ld} 相等时的水流模式Table 3 Flow patterns for different $R_{ic} \times R_{ld}$

A类改变入渗强度比 R_{ic}			B类改变长深比 R_{ld}			地下水流模式
R_{ld}	$R_{ic}(10^{-3})$	$R_{ic} \times R_{ld}$	$R_{ic}(10^{-3})$	R_{ld}	$R_{ic} \times R_{ld}$	
10	0.5	5	5	1	5	一级 RS
10	2.0	20	5	4	20	二级 RS+LS
10	5.0	50	5	10	50	三级 RS+MS+LS
10	10.0	100	5	20	100	二级 MS+LS
10	12.5	125	5	25	125	一级 LS

地长度 l 与深度 d 比值,通过单独改变 l 或 d 进行模拟.改变长深比 R_{ld} 的地下水流模拟,取渗透系数 K 为 0.1 m/d,入渗强度 ϵ 为 0.5 mm/d,即入渗强度比 R_{ic} 为 5.盆地长度取 500 m,盆地深度 d (计算时取盆地最低排泄点对应的深度)由大到小变化(变化区间为 515~35 mm/d)时,3 个河谷可能势汇的位置距模型顶面距离不变,模拟其他条件如表 2.经过模拟计算,同样得到上述 5 种地下水流系统模式(图 5).同理,固定盆地深度 d ,改变盆地长度 L ,我们得到了同样结果.

对照上述两组模拟实验研究,不难发现,在均质盆地中,给定多个河谷低地条件下,地下水流系统主要受人渗强度比 R_{ic} 和盆地长深比 R_{ld} 的影响,且有 $R_{ic} \times R_{ld}$ 相等时,地下水流模式相同的结果.表 3 列出了本次模拟实验的两组对照数据与对应的地下水流模式.

4 结论

有关 Tóth 给定水头上边界条件的地下水流系统分析中,在探讨水流模式与影响因素时,改变某一影响条件会引起盆地水均衡的变化;给定水头上边界也固化了盆地的势汇位置与数目,这与实际潜水面形成与变化条件不符.因此,Tóth 方法限制了地下水流系统特征与水流模式转化规律的研究.本文利用给定通量上边界的实验与数值模拟方法(简称 CUG-GWFS 方法),给出了地下水流模式、影响因素,以及影响因素对地下水流系统的控制.

(1)对于均质各向同性模型,其他边界条件不变,增加入渗强度或者减小渗透系数,盆地地下水流模式按照以下 5 种样式转化:简单区域水流系统(RS)→局部+区域两级嵌套水流系统(LS+RS)→局部+中间+区域三级嵌套水流系统(LS+MS+RS)→局部+中间两级嵌套水流系统(LS+MS)→简单局部水流系统(LS).(2)盆地地下水流模式受

入渗强度、渗透系数、盆地长深比,以及盆地可能势汇的多少与分布影响.(3)在一定势汇分布下,入渗强度、渗透系数和盆地长深比对模式影响的关系:保持其他条件不变,单独加大盆地入渗强度比 R_{ic} ,或加大盆地长深比 R_{ld} ,盆地水流系统按照上述 5 种模式呈有序转化;当 R_{ic} 与 R_{ld} 的乘积相同时,盆地水流系统特征也相同.

致谢:参与实验模拟研究的还有研究生刘宇、权董杰、何林青等;Tóth 教授对本文研究提出了有益建议,在此一并表示感谢.

References

- Engelen, G. B., Jones, G. P., 1986. Developments in the analysis of groundwater flow systems, No. 163. IAHS Publication, Wallingford.
- Engelen, G. B., Kloosterman, F. H., 1996. Hydrological systems analysis: methods and applications. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Eótvös Loránd University. (ed.), 2008. From the artesian paradigm to basin hydraulics—the contribution of József Tóth to hungarian hydrogeology. Publishing Company of Budapest University of Technology and Economics, Budapest.
- Freeze, R. A., Witherspoon, P. A., 1966. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resource. Res.*, 2(4):641–656.
- Freeze, R. A., Witherspoon, P. A., 1967. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. effect of water-table configuration and subsurface permeability variations. *Water Resource. Res.*, 3(2):623–634.
- Freeze, R. A., Witherspoon, P. A., 1968. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 3. quantitative interpretation. *Water Resource. Res.*, 4:581–590.
- Jiang, X. W., Wan, L., Cardenas, M. B., et al., 2010. Simultaneous rejuvenation and aging of groundwater in basins due to depth-decaying hydraulic conductivity and porosity. *Geophysical Research Letters*, 37(5):L05403, doi:

- 10.1029/2010GL042387
- Jiang, X. W., Wan, L., Wang, X. S., et al., 2009. Effect of exponential decay in hydraulic conductivity with depth on regional groundwater flow. *Geophysical Research Letters*, 36(24): L24402. doi:10.1029/2009GL041251
- Liang, X., Liu, Y., Jin, M. G., et al., 2010. Direct observation of complex Tóthian groundwater flow systems in the laboratory. *Hydrological Processes*, 24: 3568–3573. doi:10.1002/hyp.7758
- Liang, X., Shen, Z. Z., Liu, Y., et al., 2008. A multi-level sub-groundwater flow system demonstrator, China. National utility model patent, 200820066726, 2009–01–14 (in Chinese).
- Liu, Y., Jia, J., 2009. Study of groundwater flow system simulation of small drainage basin based on matlab. *Groundwater*, 31(3): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Liang, X., Dong, Q. J., et al., 2010. Experiment of groundwater flow patterns under changes of infiltration intensity. *Earth Science Frontiers*, 17(6): 111–116 (in Chinese with English abstract).
- Tóth, J., 1963. Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basin. *Journal of Geophysical Research*, 67(11): 4375–4387.
- Tóth, J., 1980. Cross-formation gravity flow of groundwater; a mechanism of the transport and accumulation of petroleum (The generalized hydraulic theory of petroleum migration). In: Robert III, W., H., Cordell, R., J., eds., Problems of petroleum migration. *AAPG Studies in Geology*, 10: 121–167.
- Tóth, J., 1999. Groundwater as a geological agent; an overview of the cause, process, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, 7(1): 1–14. doi:10.1016/j.jcrs.2009.07.023
- Tóth, J., 2009. Gravitational system of groundwater: theory, evaluation, utilization. Cambridge University Press, New York, 297.
- Zijl, W., 1999. Scale aspects of groundwater flow and transport systems. *Hydrogeology Journal*, 7(1): 139–150. doi:10.1007/s100400050185

附中文参考文献

- 刘宇,贾静,2009.基于 Matlab 小型潜水盆地地下水流系统模拟研究. *地下水*, 31(3): 1–3.
- 刘彦,梁杏,权董杰,等,2010.改变入渗强度的地下水流模式实验. *地学前缘*, 17(6): 111–116.
- 梁杏,沈仲智,刘宇,等,2008.一种多级次地下水流系统演示仪.中国国家实用新型专利,200820066726,2009–01–14.