

地下水流系统分异的试验演示及其意义

高宗军

(山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:地下水在渗透介质中的流动是连续的,受补给与排泄条件的影响,在同一渗流场中会出现若干水流系统,称为地下水流的分异。通过简易的试验装置,可以容易地模拟这种水流分异的情形。相应试验如下:在均质各向同性的渗透介质中,保持顶部自由水面补给边界的水头不变,在不同排泄条件下、存在弱透水层、相对隔水体及放置局部加热装置的情况下,分别得到了地下水流分异的情形。结果表明:水流在不同渗透介质间确实存在折射现象;在弱透水层或相对隔水体的边缘,水流具有加强、聚集的性质,即渗透流场中存在强径流带;与流场总体流向不一致的方向上,会出现向隔水体靠近的“浮流”现象;水流加热后,其径流速度明显加快。

关键词:地下水;渗透介质;试验;水流分异

中图分类号:P641.2

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)02-0017-08

Experimental Demonstration and Significance of Groundwater Flow System Differentiation

Gao Zongjun

(College of Geological Science & Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Groundwater has the continuous flow in the infiltration medium and because it is affected by recharge and discharge conditions, there appear lots of flow systems in the same seepage field, called groundwater flow fractionation. Through the simple test apparatus, the case of such flow fractionation will be easily simulated. The corresponding test was completed as follows. In homogeneous isotropic permeability media, the head of the top of the free water surface was kept to recharge boundary unchanged; under the conditions of different discharge the presence of the aquitard, relatively impermeable body and placed the local heating device, the groundwater flow fractionation situation was obtained respectively. The results show that refraction phenomenon does exist in different permeable media of groundwater flow; on the edge of aquitard and relatively impermeable body, the flow has the properties to strengthen and gather together; that is to say, there is strong flow zone in the seepage field; when it is in the inconsistent direction with the overall flow direction of flow field, there will appear the "floating flow" phenomenon that the flow comes close to impermeable body; after the flow is heated, its runoff rate will significantly accelerate.

Key words: groundwater; infiltration medium; experiment; groundwater flow fractionation

地下水在渗透介质中以渗流的形式运动。这种运动受控于哪些因素,一直以来是水文地质学家关心的核心内容之一。传统的观点认为地下水以水平运动为主,即旁侧的河流中的水可能会直接(最短距离地、由侧向呈几乎水平方向)补给地下水,而河流两侧的地下水向河流排泄时也是沿着几乎水平方向(最短距离)进行的。但是大量的事实说明,地下水在重力作用下,在接受大气降水或地表水的补给以后,首先以垂向或近于垂向向下运动,之后再发生横向或称为水平的运动。自然界条件是复杂多变的,地下水流运动的方式及方向千变万化,甚至相邻的降水或者地表水渗入地下以后,将朝着不同的方向运动。总之,地下水的运动,与其他物质的运动一样,是能量与物质守恒的结果。本文主要展示简化了的、理想状态下的含水介质中,地下水

收稿日期:2012-09-25

作者简介:高宗军(1964—),男,山东泰安人,教授,从事水文地质方面的教学与科研工作。E-mail: gaozongjun@126.com

流运动的模式及其分异现象的实验结果。

关于地下水流运动的问题,早在 1899 年, King^[1]就提出了重力驱动地下水的概念,并绘制了地下水流运动的剖面图。之后, Hubbert^[2]提出了地下流体势的概念,分析了区域地下水流的特点,给出了河间地块的流网。这些设想和观念,被人们所忽略,在相当长的时间内没有引起人们的足够重视。直到 1963 年, Tóth J^[3]利用上部边界水头为线性函数与正弦函数叠加的模式,通过求解 Laplace 方程,得出了首张在理论地形势影响下的地下水流形态剖面图(图 1)。

经过近 20 年努力, Tóth^[4]于 1980 年提出了近于完美的地下水流运动的模式图(图 2),可称之为托特模式图。该图中, Tóth 全面阐释了在地形势的驱动下形成的不同级别的地下水流形态,同时给出了地下水的温度及化学变化。并指出在不同级别的地下水流系统之间,存在地下水滞流带及水动力圈闭区(随地下水迁移的物质及热量的收敛、聚集处)。之后, Garven^[5]等对这一理论的发展做出了突出的贡献。

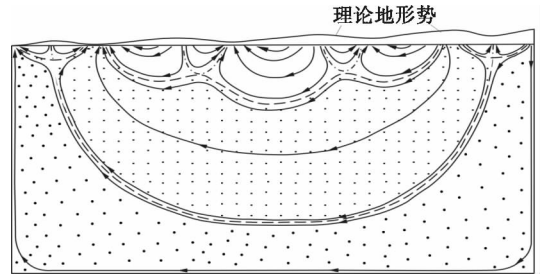


图 1 利用上部水头边界为线性函数与正弦函数叠加条件下模拟的地下水流场剖面图^[3]

Fig. 1 The use of upper head boundary for linear function and sine function superimposed conditions to conduct simulated groundwater flow field^[3]

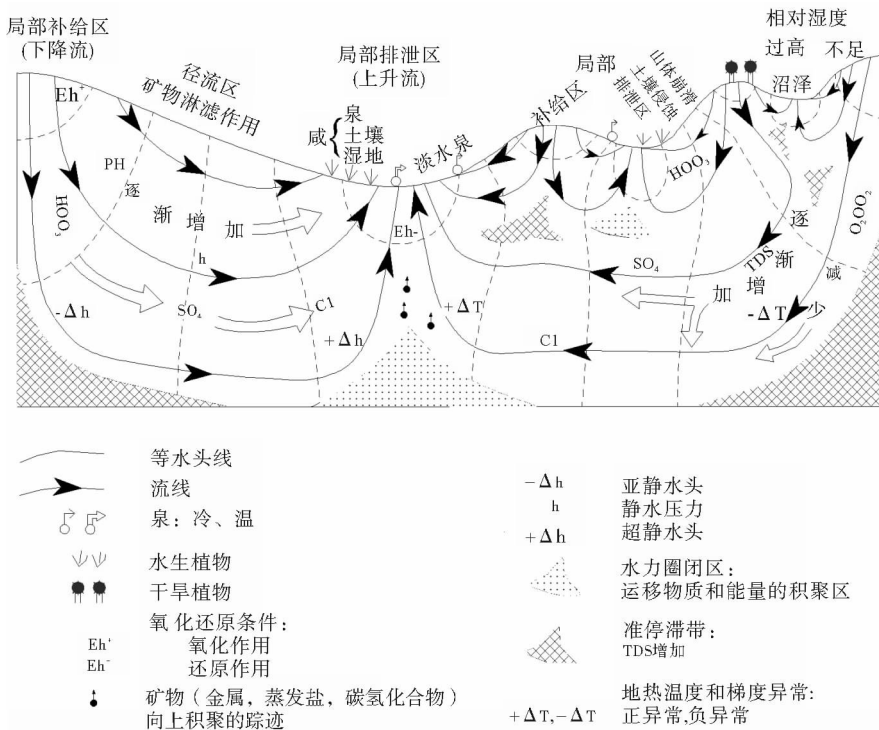


图 2 地形势控制下地下水流系统与地温场和化学场变化情况模式图^[4]

Fig. 2 Ideograph about ground situation to control groundwater flow system, geothermal field and chemical field changes^[4]

国内对此的研究起步较晚,直到 1980 年代中后期才引起了人们的重视。鲁静^[6]最早于 1985 年使用了水流系统的概念,张人权^[7]于 1987 年在《水文地质学发展的若干趋向》一文中,首次引入地下水流理论的概念。其后关于地下水流系统或地下水流运动系统的研究开始活跃,1995 年底以前,先后由李文鹏^[8]、戴振学^[9]、武选民^[10]、仵彦卿等^[11]针对不同问题对地下水流系统概念或理论进行了论述。

相关文献越来越多地见诸报端,有关研究逐渐得到了加温,尤其是梁杏、万力等研究团队,在各自的条件下分别开展了相应的卓有成效的研究。万力等在地下水流动系统的理论研究方面多有建树;2008—2011年,梁杏等进行了不同降水强度的砂槽物理模拟实验研究(图3),并取得了重要进展^[12-13]。

作者分别于1991年和1993年在盐卤水运动的研究中,提出过重力作用可以使地下水在垂向上发生运动的理念,并认为这种运动是可以穿透弱透水层或隔水岩系而进行的^[14-15]。作者近年来对地下水流动系统也进行了潜心研究,之后自制相应的简易砂槽试验设备,完成了若干试验,同样得到了不同分级的地下水流动系统的图景。

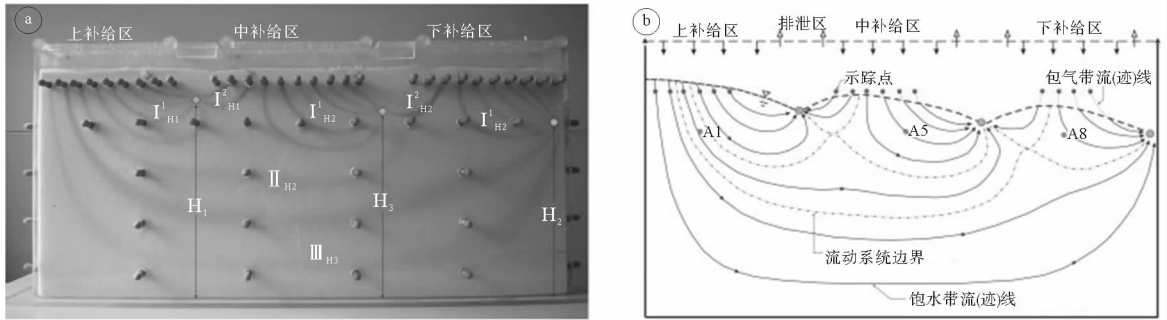


图3 不同降水强度情况下三级地下水流动系统模拟试验结果图

Fig. 3 Three level groundwater flow system simulated test results in the case of different precipitation intensity

1 试验材料与试验过程

砂槽规格如图4所示。试验用砂为山东省胶南市灵山卫镇海岸粗砂,渗透系数为148.5 m/d;作为弱透水层的细砂为山东省青岛市黄岛区金沙滩景区中细砂,渗透系数为23.4 m/d;相对隔水体是自制的沙土,实测其渗透系数接近于1 m/d(表1)。试验采用人工和定水头补给(模拟降水或地表水补给)、不同排泄水点的方式,在补给处(上部)注射红色墨水,观察其径流形态。

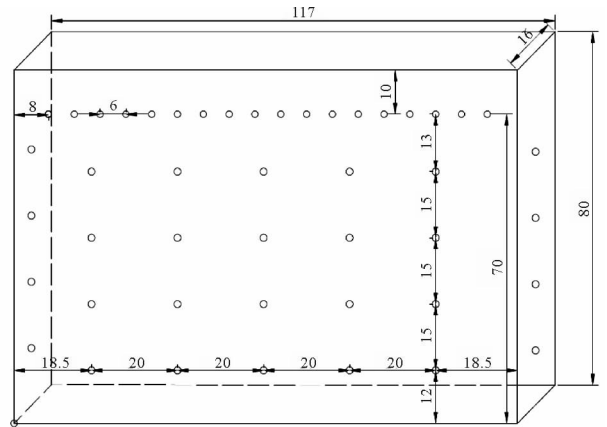
最初采用人工喷洒模拟降水,但是降水强度不易控制,砂槽内形成的红色迹线不易稳定,容易变化方向;故在后期采用定水头自由水面水体补给的方式(图5)完成了试验,其优点是补给边界固定、补给强度均等、人工容易控制,可同时开启不同的排水点,砂槽内红色水流迹线容易稳定,易于观察。

2 试验结果

由于人工喷洒模拟降水的强度难以控制,只完成了定水头补给边界条件下的试验,故以下介绍的是定水头补给(相当于地表水常水头补给边界)情况下的试验结果。

2.1 补给与排泄条件都是地下水流动分异的主控因素

Tóth等提出的地下水系统分级,主要是由于变化的地形势导致地下水的补给条件变化引起的。试验证明,定水头补给边界、不同排泄点条件下,同样可出现地下水系统的分级现象(图5—图12)。不同地下水流动



单位: cm

图4 试验装置示意图

Fig. 4 Experimental apparatus schematic diagram

表1 试验砂土类型及其来源位置表

Tab. 1 The test sandy soil types and their source position

| 试验砂土 | 粗砂 | 细砂 | 砂土 |
|------------|-------|------|------|
| 渗透系数/(m/d) | 148.5 | 23.4 | <1.0 |
| 来源 | 青岛金沙滩 | 胶南海滩 | 自制 |

系统分级,实际上是地下水流的分异造成的,故作者提出了地下水流分异的概念。

图 5—图 7 是定水头补给边界条件下不同排泄点情况下的水流形态。与人为控制的补给降水强度条件下的情况一样,在定水头补给边界条件下,不同的排泄点同时出现也会产生地下水流系统的分异现象。这说明,不仅仅是在补给条件发生变化时,当排泄条件发生变化(排泄点的不同,或排泄途径的差异)时,径流场中地下水流也会出现分异。因而,地下水的补给和排泄条件共同构成地下水流分异的主导因素。试验还说明,地下水的径流条件也是地下水分异的主要控制因素,比如遇到隔水体或强径流带时,地下水流会发生变异(图 8—图 11)。

多个排泄点情况下,在排泄点之间的一定区域里,存在混合水流的情况,可称之为紊乱区或紊流区,类似于 Tóth 所提出的准停滞带和水力圈闭区域(详见 3.5 渗透水流的“驻点”问题)。

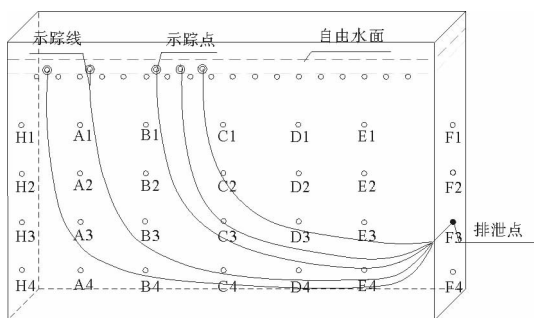


图 5 定水头补给上部边界情况下单个地下水排泄点时出现的地下水流图

Fig. 5 Groundwater flow appears with the single groundwater discharge point when constant-head recharges the upper boundary

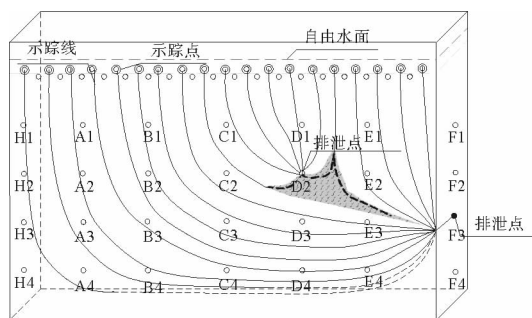


图 6 定水头补给上部边界情况下两个地下水排泄点时出现的地下水流图

Fig. 6 Groundwater flow appears with the two groundwater discharge points when constant-head recharges the upper boundary

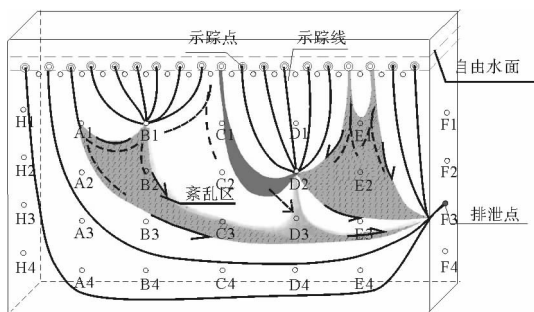


图 7 定水头补给上部边界情况下三个地下水排泄点时出现的地下水流图

Fig. 7 Groundwater flow appears with the three groundwater discharge points when constant-head recharges the upper boundary

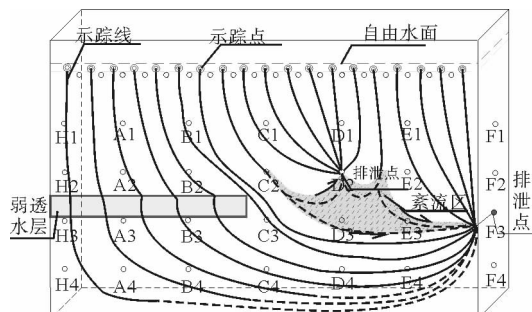


图 8 渗透水流在不同介质界面上的折射

Fig. 8 The refraction of permeating stream in different media interface

2.2 渗透流场中的水流分布及运行规则有序

砂槽渗透流场中的水流,与理想中的层流一样,运行秩序井然,相互不掺混。在流场中相距较近的任意两个点(或两个单元体)间,如果不在一流线(迹线)上,则不会或较难发生相互的水流交换。表观上,渗透水流不追求最小功率化,并非就近取捷径向排泄点运动,而是按照秩序依次运行,有时会绕出很远,出现“违背常理”的“舍近求远”结果。

以往人们所持的观点是距离水流可携带迁移的污染源较近点的地下水易受到污染。但事实上并非如此,在距离水流可携带迁移的污染源较近点的地下水,并非一定要比距离较远点的地下水遭受污染的机会更大,甚至有时较近点地下水根本就不受污染。以上结论,对于解释溶于水、且以对流迁移为主的污染物质的迁移具有重要的意义。这就要求,今后在进行地下水流场判定时,包括地下水补给来源判断,地下水污染预测评价等,必须对地下水流系统进行科学分析,正确评价,不能一概而论。

2.3 渗透水流在不同介质界面上的折射演示非常清楚

在渗透流场中加入弱透水介质体(图 8),可清楚地看到地下水流在不同透水性含水介质之间的折射。这种折射,符合传统意义上的折射原理。

通过试验也可以看到,在弱透水体的边角处,存在流线(迹线)遭受挤压、收敛聚集的现象,说明在这一小的区域里,水流强度较之其它区域要更高一些。在流场中存在隔水体时,这种现象更为显著(图 9)。本文中这些水流强度较高的区域称之为强径流区(带)。

2.4 地下水向阻水体靠近的“浮流”现象

在弱透水体的同样位置加入隔水体时,情形就会变得另外一个模样(图 9)。由于整个砂槽体积有限,隔水体受到的压力是很小的,因而尽管这个隔水体具有一定的透水能力,但是却完全起到了隔水体的作用。隔水体位于左侧,但是整个渗流场似乎因此向右倾斜,并于隔水体的右上角边缘处,明显地出现了流线(迹线)被挤压、收敛、聚集的情况。

当隔水体位于该流场的靠下部分时,流场形态又呈现另外一幅景象(图 10)。水流在隔水体的下方及上角边缘分别得到了加强、聚集,绕流情况特别明显。进一步说明在渗透流场中,靠近隔水体处的强径流带是客观存在的。

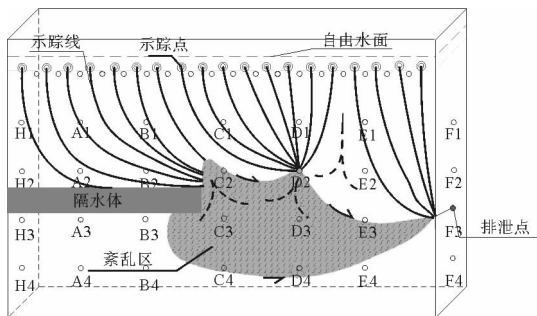


图 9 存在横向隔水体时的流场形态图

Fig. 9 The flow field morphology when presenting the transverse impermeable body

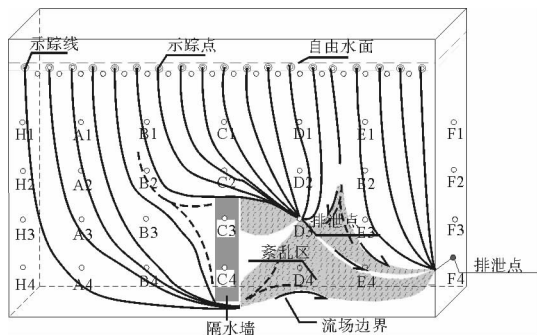


图 10 存在竖向隔水体(墙)时的流场形态图

Fig. 10 The flow field morphology when presenting the vertical impermeable body

当隔水体出现在补给区方向时,甚至出现了示踪水流“上漂”现象(图 11)。这种水流与流场中的水流总体运动方向不一致,具有向隔水体或弱透水体边缘靠近的趋势,本文称之为“依赖”水流或“浮流”。运动的流场中,靠近隔水体的水体也会随着发生运动,于是形成隔水体边缘的水体空缺,必然需要新的水体予以补充,故形成背离总体流向的“依赖”水流或“浮流”的景观。

2.5 渗透水流的“驻点”问题

数学上函数的导数为 0 的点称为函数的驻点,驻点可以划分函数的单调区间。驻点也称为稳定点,临界点。通过试验看到,在渗透流场中也存在类似的驻点。从流线(迹线)的分异情况可以看出,在稳定的流场中,存在近似不动(稳定)的“驻点”。在 Toth 的模式图中,被称之为水力圈闭区域和准滞留带(图 2)的中心位置,应该是驻点的位置。在驻点附近的水力圈闭区域和准滞留带中,渗透水流的流速缓慢,方向混乱,是不同水流系统交汇的水动力“边缘”区域。

需要说明的是,试验过程中发现,驻点或者水力圈闭区域和准滞留带,在补给和排泄条件发生变化时,都是可以变化或发生“迁移”的。

从能量守恒的角度看,任何运动的物质,都会遵循能量守恒。持着这样的态度,进行了“热能”对渗透水流的影响试验。试验采用在流场中事先放入电加热器,在流场趋于“稳定”状态时,接通电源使加热器开始升温。加热开始前后的渗流场流线(迹线)变化情况见图 12 所示。

试验结果显示,在地下水流场中,局部的热量可以提高其周围地下水的温度,同时可以在一定程度上加速地下水的径流速度;但是,热量的加入,并不能改变整个地下水流场的总体形态,影响范围仅局限于热量所及的范围;热传导速度很快,且以向上传导为主。

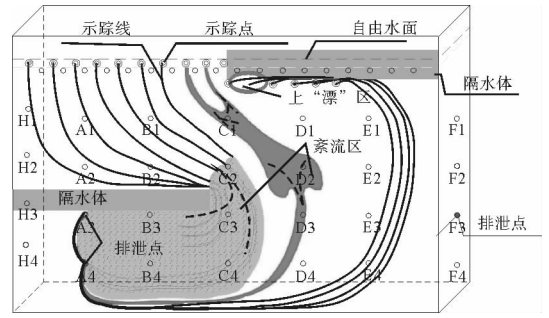
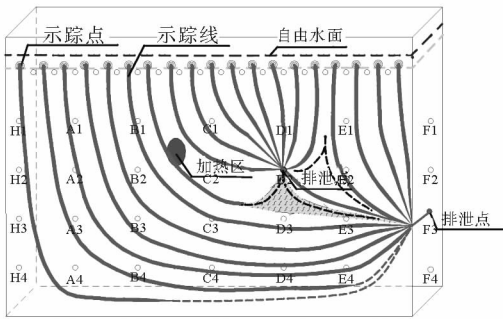
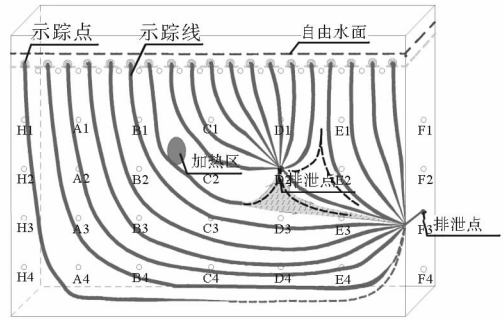


图 11 在靠近隔水体边缘存在“依赖”水流,出现示踪水流“上漂”现象图

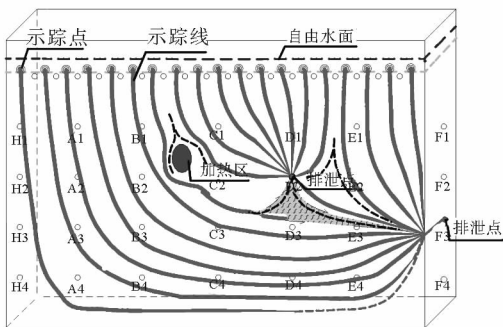
Fig. 11 In the near impermeable body existing “dependent” flow, appears tracer flow “on the drift” phenomenon



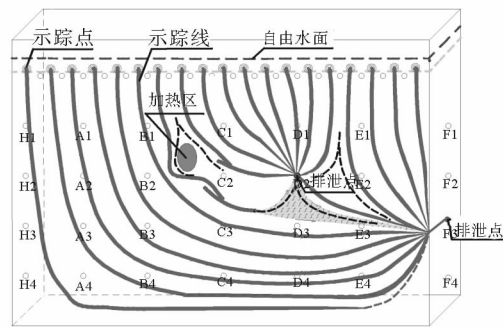
(a) 未加热前



(b) 开始加热



(c) 加热点周围迹线出现“扩张、断裂”



(d) 加热的迹线出现超前

图 12 加入热能后渗流场中的迹线变化图

Fig. 12 After joined heat, the trace changes in the seepage field

对这样的结果有以下几个方面的解释:①水温提高后,其粘滞系数降低,所以在同样的压力(或驱动力)条件下,温度高的流体要比温度低的流速快,所以出现加热后,先在加热点周围流线(迹线)出现“扩张、断裂”,尔后加热流线(迹线)出现超前的现象。②热量随着水流发生对流,其速度受限于水的径流速度,而且在水流运动中,还不断地与周围环境发生热量的交换,因而沿着径流的方向,水温度的提高并不迅速,而在加热点的上方,却很快进入高温状态。③由于加热器功率较大(较小时无法较快地提高水的温度),在加热 15 min

后,加热器上方出现了沸腾,并有气泡和水汽由上部溢出。

由此说明,热传导速度是很快的,且加热后的水体密度变小,促使热水向上运动的趋势明显,沿着径流方向输送的热量相对较小。这样的结果同时也可以对地热的热源做出一些判断,即自然界温泉的热源,应该位于温泉之下部,或者位于泉水径流的途径之中,或者靠近排泄点;热源位于补给区的可能性较小。

3 结论

通过所做的定水头补给条件下不同排泄点存在时的地下水流流线(迹线)的观察,结合前人的试验或研究成果,可以初步得出如下结论:

1)地下水的运动是水在渗透介质场中的流动,服从能量和质量守恒原则,水流总是向着能量递减最快的方向发展;但是表观的现象显示,多数水质点的运动并非沿着最小功率化方向,应该是由这些水质点周围的环境所造成的。由此可以推论,地下水的任意质点所受的力达到均衡时,则保持静止状态;地下水的任意质点所受的力不均衡时,将向着受力减小的方向运动。

2)试验中的水流是秩序井然的层流,两个垂直于流向且靠近的水质点间往往不发生相互掺混,只有在流线方向上发生水质点的先后交替;即地下水流速度足够快时,发生横向交流的机会很小。

3)地下水运动场所为渗流场,随着补给与排泄的位置、强度及方式发生改变,则地下水流场就会发生相应的变化;地下水的补给(势源)与排泄(势汇)都能够改变地下水的流场,多个排泄点情况下,即使补给条件是固定的,也会围绕各个排泄点出现多个具有大小分级的水流系统。

4)在三个以上的水流系统交汇处(固定边界可看做一个“特殊流场”)存在相对稳定的水力圈闭区域和准滞留带,其中心点可称之为“驻点”,该点及其周围一定范围内的水质点所受的力是相对均等的;但是他们会在补给及排泄条件变化、受力情况改变时发生迁移或消失。

5)与靠近排泄点(汇点)的补给水量形成的流线的径流速度相比,由远离排泄点(汇点)的补给水量形成的流线的径流速度显然是偏低的,这样的结论与达西定律的普适性似有冲突:即渗流场中在垂直于流向的剖面上,其单位面积上的水流强度是不等的,即存在所谓的“强径流带”。在靠近弱透水体或隔水体的角边缘区域,是水流强度较大的强径流区域(带);径流强度(径流速度)随着远离补给-排泄主轴线而逐渐变小。

6)热量的加入,可以改变流场的形态,并能够加大流速,即渗流的局部加温,具有加速径流的作用;同时,地下水流的温度升高,热量向上传导的作用十分显著。

7)在差别不大的两个渗透介质之间存在渗流的折射现象,并遵从折射定律;在差别较大的两个渗透介质之间,一般不进行水的交换,除非所施加的压力足以达到弱透水体的“初始水力梯度”。

8)渗透流场中的水流,在与流场总体流向不一致的方向上,具有向隔水体或弱透水体边缘靠近的趋势,本文称之为“依赖”水流或“浮流”。

9)地面上距离水流可携带迁移的污染源较近点的地下水,并非一定比距离较远点的地下水受污染的机会更大,甚至有时较近点地下水根本就不受污染。

参考文献:

- [1]King F H. Principles and conditions of the movement of ground water[R]. America:Govt. Prty. Off. ,1899.
- [2]Hubbert M K. The theory of ground-water motion[J]. The Journal of Geology,1940,48:785-944.
- [3]Tóth J. A theoretical analysis of round ater flo in small drainae basins[J]. Journal of Geophysical Research,1963,68(16):4795-4 812.
- [4]Tóth J. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations[J]. Hydrogeology Journal,1999,7:1-14.
- [5]Garven G, Freeze R A. Theoretical analysis of the role of groundwater flow in the genesis of stratabound ore deposits[J]. American Journal of Science,1984,284:1085-1124.
- [6]鲁静. 上兰泉与晋祠泉的泉域划分及水流系统[J]. 河北地质学院学报,1985(4):15-19.
Lu Jing. A division of the extents of Shanglan spring Jingchi spring and their groundearer stream system[J]. Journal of Hebei College of Geology,1985(4):15-19.

- [7]张人权. 水文地质学发展的若干趋向[J]. 水文地质工程地质, 1987(2):1-2.
Zhang Renquan. Several trends of the development of hydrogeology[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1987(2): 1-2.
- [8]李文鹏. 甘肃省民勤盆地深层淡水及表层咸水成因[J]. 地质论评, 1991, 37(6):546-553.
Li Wenpeng. Origin of deep fresh groundwater and shallow saline groundwater in the Minqin Basin, Gansu province[J]. Geological Review, 1991, 37(6):546-553.
- [9]戴振学. 地下水流系统概念模型研究[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(2):8-10.
Dai Zhenxue. Research on conceptual model of groundwater flow system[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1992, 19(2):8-10.
- [10]武选民, 王树棕, 方长生, 等. 红碱渣一沟岔地区地下水流系统研究[J]. 水文地质工程地质, 1993(6):30-34.
Wu Xuanmin, Wang Shuzong, Fang Changsheng, et al. A study on groundwater flow systems in Hong Jiannao-Goucha area of Northern Shan Xi[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1993(6):30-34.
- [11]仵彦卿. 地下水流系统参数估计方法[J]. 勘查科学技术, 1994(1):40-44.
Wu Yanqing. Study of the method to estimate the parameters of groundwater flow system[J]. Site Investigation Science and Technology, 1994(1):40-44.
- [12]Liang X, Liu Y, Jin M G, et al. Direct observation of complex Tóthian groundwater flow systems in the laboratory[J]. Hydrological Process, 2010, 24:3568-3573.
- [13]刘彦, 梁杏, 权董杰等. 改变入渗强度的地下水流模式实验[J]. 地学前缘, 2010, 17(6):111-116.
Liu Yan, Liang Xing, Quan Dongjie, et al. Experiments of groundwater flow patterns under changes of infiltration intensity [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6):111-116.
- [14]高宗君. 中国东部地区白垩-第三系含盐盆地(咸)卤水水化学特征[J]. 水文地质工程地质, 1991, 18(5):38-40.
Gao Zongjun. Hydrochemistry of (saline) brine in cretaceous Tertiary Basins of eastern China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1991, 18(5):38-40.
- [15]高宗君, 宋满升, 李平兰. 江汉盆地第三系钾盐矿床的水化学特征及其演化规律[J]. 地质地球化学, 1993(4):69-73.
Gao Zongjun, Song Mansheng, Li Pinglan. Jiangnan Basin, potash deposit third hydrochemical characteristics and evolution laws[J]. Geology-geochemistry, 1993(4):69-73.

(责任编辑:高丽华)