

区域地下水流理论最新进展 ——区域地下水流理论、应用与发展国际研讨会综述

张俊¹, 尹立河¹, 侯光才¹, 蒋小伟²

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 中国地质调查局干旱-半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘 要:当前世界面临着越来越严重的水资源缺乏等环境压力, 大尺度区域地下水资源与环境问题日益得到重视。在区域地下水流理论创立、应用与发展 50 年之际, 由中国地质调查局和国际水文地质学家协会区域地下水流专业委员会主办, 西安地质调查中心和中国地质大学(北京、武汉)等单位承办了区域地下水流理论、应用与发展国际学术研讨会。区域地下水流理论创始人 Tóth 教授以及来自 13 个国家的 160 多位水文地质专家从地下水流理论方法、实践应用等方面进行研讨和交流, 将对区域地下水流理论的研究起到积极的促进作用, 有力推动该理论的进一步发展和实际应用。笔者系统分析梳理了与会者的报告, 归纳总结了国际区域地下水流理论研究进展和发展动态, 以期对区域地下水流理论更加广泛地应用于水文地质环境地质相关研究领域提供参考。

关键词:国际研讨会; 区域地下水流; 综述

中图分类号: P66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6248(2014)03-0200-05

A Recent Review of Regional Groundwater Flow Theory

—International Symposium on Regional Groundwater Flow Theory, Applications and Future Development

ZHANG Jun¹, YIN Li-he¹, HOU Guang-cai¹, JIANG Xiao-wei²

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, CGS, Xi'an 710054, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: With seriously increasing pressure on water resources and the environment, large-scale regional groundwater resources and environmental issues are more and more concerned at present. In the time of development of regional groundwater flow theory and application for 50 years, International Symposium on Regional Groundwater Flow Theory, Applications and Future Development has been held in Xi'an, China during the period of 22 to 23 June 2013. The Conference brought together the world's most renowned experts in the field of regional groundwater flow, including 160 researchers from 13 countries. This paper systematically reviews the participants' analysis report and summarizes international progress and developments of the theoretical study of regional groundwater flow. It will promote the further development and practical application of regional groundwater flow theory in the field of hydrogeology and environmental geology.

Key words: international symposium; regional groundwater flow; review

收稿日期: 2014-01-03; 修回日期: 2014-08-04

基金项目: 中国地质调查局项目“鄂尔多斯盆地海流兔河流域生态水文地质调查评价”(12120113104100)

作者简介: 张俊(1982-), 男, 山西太原人, 硕士, 助理研究员, 主要从事水文地质、生态水文地质研究。E-mail: 36170038@qq.com

1 会议概况

“区域地下水流理论、应用与发展国际学术研讨会”由中国地质调查局和国际水文地质学家协会区域地下水流专业委员会主办,西安地质调查中心和中国地质大学(北京、武汉)等单位承办。大会于2013年6月22~23日在西安举行,来自中国、美国、俄罗斯、加拿大和澳大利亚等13个国家的160多位代表参会。国外代表共有17位,其中包括国际水文地质学家协会区域地下水流专业委员会主席 Judit Mádl-Szonyi 教授、区域地下水流理论创始人 József Tóth 教授、国际著名水文地质学家 G. B. Engelen 教授等。国内代表来自中国地质调查局及所属单位、中国地质大学(北京、武汉)、北京大学、南京大学、吉林大学和中国科学院地质地球物理研究所等25个单位。会议安排了34位国内外专家进行了学术交流,交流内容包括区域地下水流理论研究新进展、发展趋势和实际应用等。

2 会议综述

本次会议议题可分为理论与方法研究和实践与应用研究两大方面。其中,理论与方法研究主要包括地下水流结构和特征等的描述,地形、非均质性等因素对地下水流模式的影响作用,地下水流系统的最新数值模拟理论和方法,以及从浮力、能量和水头等不同角度和概念出发对地下水流系统的理解等方面。实践与应用研究主要包括世界各地不同地区地下水流系统的实例研究,利用水化学、同位素和数值模拟等技术手段研究区域地下水流系统的实例,以及地下水流系统理论在高放废物地质处置、CO₂ 地质储埋、地面沉降和泉水成因等方面应用研究。

2.1 区域地下水流理论研究与方法

地下水流理论创始人加拿大阿尔伯特大学 Tóth 教授以“地下水流系统和现代水文地质学:半个世纪的历程”为题,介绍了区域地下水流理论及其基本要素的发展、内涵和应用,并介绍了水流系统地质营力在印度 TamilNadu、美国大西洋的滨海平原、加拿大亚伯达省马蹄湖和澳大利亚西南部 Murray-Darling 盆地的实际应用。

瑞典斯德哥尔摩皇家理工学院土地与水工程系

Anders Wörman 教授介绍了地表水与地下水相互作用的新进展。采用分形理论对三维地形和地下水流进行了光谱分析,指出渗透系数在浅层地表的衰减深度限制了地下水流,地下水更新速率受第四系沉积的影响。通过流域水资源滤波,计算了地表水、浅层地下水和深层地下水的响应时间。研究表明,精细的三维地形分析提供了地下水循环的基本尺度,景观特征减少了地表水流随波长的变化,地下水循环的分形尺度解释了流域水资源滞留时间的多重分形分布。

中国地质大学(北京)蒋小伟副教授介绍了区域地下水流理论的最新进展。利用改进后的剖面二维流解析解讨论了水流系统的驻点及其类型,刻画了渗透系数随深度衰减条件下水流系统的特征,利用数值模拟方法研究了嵌套型水流系统的年龄分布特征。最后,介绍了鄂尔多斯盆地典型剖面地下水流系统研究的最新进展。

美国亚利桑那大学 Jim Yeh 教授作了题为“监测、刻画及预测地下过程的信息自动融合”的报告。探讨了小尺度上相同类型信息和不同类型信息的融合和盆地尺度上相同类型、不同类型信息和不同尺度信息的融合。介绍了地球物理扫描和水力层析方法在刻画小尺度含水层非均质中的应用,同时介绍了适用于盆地尺度的河川水力层析法、闪电扫描法和地震扫描法。

中国地质调查局西安地质调查中心尹立河博士针对大型沉积盆地厚度/长度小的特点,进行了大型沉积盆地区域水流系统的理论分析。通过随机生成具有层状结构的渗透系数结构,采用剖面二维模拟方法计算了水头分布,利用 MT3DMS 计算地下水年龄,根据模拟结果分析了各向异性对水流模式的影响及盆地地下水年龄分布特征。

加拿大 WDA 咨询公司 K. Udo Weyer 教授的报告题目为“浮力的实际应用——在区域地下水流条件下压力势和反向浮力”。报告指出压力梯度并不是地下流体流动的驱动机制。Hubbert's 压力势能可较好的应用于固碳、碳汇恢复速率及天然气形成的研究。变密度流是一个静水条件下受浮力影响的连续介质工程力学问题,在地表的水动力条件下不存在。

瑞典 Rrens AB 公司 Lars Marklund 博士分析了地形对区域水流的控制作用。以水资源保护区的圈定和核废料储存两个实例说明了区域地下水流研

究的重要性。报告指出,水位比可用于识别具有明显区域地下水流的地区。采用光谱分析的三维地下水流解析解,能够用以分析不同埋深处的地下水流的空间尺度。

荷兰阿姆斯特丹自由大学 Engelen 教授从嵌套能量流系统的角度阐述了对地下水流系统的理解。从能量流系统概念入手,阐述了能量流的类型、模式及生命周期。然后列举大气环流、洋流、区域地表河系、闪电、地热流、南极冰流等能量流形式,最后指出大型地下水流系统大多是混合驱动。他通过跨学科视野丰富了对地下水流动的理解。

比利时布鲁塞尔自由大学 Wouter Zijl 教授介绍了基于水头条件和补给条件两种水位条件的水流系统数值分析。提出了“双约束法”数值模拟技术,并以荷兰 Kleine Nete 流域为例进行了实际应用。

波兰华沙理工大学 Marek Nawalany 教授介绍了速度为变量的地下水模拟方法。通过含水层——弱透水层三维重力流的模拟研究,展示了该方法可以准确估计三维达西流速,当识别水流系统及准确评价河流—含水层系统时,可以在水流迹线高度弯曲的条件求解三维地下水流问题。

比利时蒙斯大学 Pascal GODERNIAUX 教授介绍了区域尺度含水层的水流系统划分。利用数值模型定量模拟了地下水排泄与补给的关系。该模型能够实现模拟区区域循环的可视化,且能定量划分两个间隔的补给量。

中国地质大学(北京)的王旭升教授利用剖面数值模拟技术分析渗透系数各向异性对局部地下水流系统的抑制作用。研究发现局部水流系统的穿透深度与 K_h/K_z 的平方根近似呈反比,由于自然状态下 K_h/K_z 一般很大,局部水流系统往往被限制在比较浅的部位。

澳大利亚福林德斯大学 Etienne Bresciani 博士讨论了区域地下水流理论的挑战:水头。针对经典区域地下水流理论中上边界为定水头边界的缺陷,指出水头形态受地形、补给量和含水层渗透性能共同控制。

2.2 区域地下水流理论实践与应用

中国地质调查局文东光研究员介绍了中国水文地质调查进展与展望。讲述了中国水文地质发展的简史,指出中国有组织的水文地质调查工作于 1949 年开始,可分为地质部和地矿部时期和中国地质调查局时期两大阶段。报告回顾了中国 60 年来水文

地质调查的进展,介绍了华北平原、鄂尔多斯盆地、西南岩溶区及严重干旱缺水地区等地的水文地质工作及我国地下水动态监测、全国地下水污染调查、地热资源调查工作的最新进展。最后,对未来 8 年水文地质调查进行了展望。

西安地质调查中心候光才教授级高工以中国鄂尔多斯盆地含水系统与水流系统研究为题,介绍了鄂尔多斯盆地地下水勘查采用的研究手段和方法,以及在地下水系统划分及典型剖面水流系统研究等方面取得的一系列成果。最后指出,对盆地尺度复杂含水层系统,可利用岩相古地理分析、地球物理勘探、水文地质钻探、地质统计学分析和三维地质建模等综合方法进行研究。在盆地尺度水流系统研究中,可利用水动力场、温度场、同位素与水化学分析和数值模拟等综合方法,来识别不同级次水流系统的空间分布和定量刻画。大型盆地区域地下水流系统中的驻点,可能占据了一定的区域,其矿化度高低取决于含水介质的可溶盐含量。由于驻点附近地下水流动非常缓慢,不宜大规模的开发利用。

澳大利亚福林德斯大学 Andrew Love 教授作了题为“一个著名含水层的新认识:澳大利亚大自流盆地水文地质”的报告。采用非稳定流模型对盆地进行重新建模,惰性气体分析显示地幔和泉水排泄有直接联系,介绍了采用铀系测年法测 Beresford 山石灰华,用于研究新构造运动。报告指出,需要构建新的大自流盆地的概念模型,包含水文地质、水化学、新构造运动和模拟方法。报告还分析了大自流盆地的 Toth 流条件。

匈牙利罗兰大学 Judit MÁDL-SZÖNYI 教授介绍了区域水流系统排泄区对深部碳酸盐系统的影响。首先介绍了区域深层岩溶系统中的地下水流系统特征,然后以布达地区热喀斯特为研究实例,介绍了岩溶排泄区的一种复杂生物地球化学排泄现象——“喀斯特腐蚀生物膜”现象,分析了其对不同排泄情景下的喀斯特作用的影响,揭示了生物膜与地下水的交互作用。

中国地质科学院岩溶地质所邓艳博士作了题为“中国西南岩溶区地下水动态和资源”的报告,简要介绍了我国岩溶区和岩溶水的特点和利用情况,介绍了岩溶地下水的调查及监测工作,并介绍了依赖岩溶地下水的植被生态系统的研究进展,阐述了西南岩溶区地下水储存能力的评价方法,最后分析了

森林对岩溶泉水化学特征的影响。

佛罗里达州立大学胡晓农教授分析了 Spring Creek 泉淡水和海水交替对 Wakulla 泉的影响。采用泉流量和水质动态数据,通过建立地下水流的观念模型,揭示了两个泉之间相互作用的三种不同循环过程。研究显示,依据条件的不同,佛罗里达含水层地下水或向 Wakulla 泉排泄,或向 Spring Creek 泉排泄,地下水从下游的 Spring Creek 泉向上游的 Wakulla 泉流动,这种向上游移动的现象可以引起 Wakulla 泉的水质变化。

俄罗斯石油水文地质科学院 L. A. Abukova 教授分析了俄罗斯东西伯利亚 Nepsko-Botuobinskaya 背斜区基性岩沉积物地层压力衰减机理。报告指出,地层压力衰减出现的 3 个主要因素为高矿化的地下水渗入基岩沉积物、盆地断层的吸收作用及冷水流入使整个断面冷却。

南京大学叶淑君博士介绍了长江三角洲地区过量开采地下水引起区域地面沉降的特征和数值模拟。提出了基于修正麦钦特模型的地面沉降模型 (LS-MM 模型),新的数值方法—多尺度有限单元法 (MsFEM),用于求解具有高度非均质性的大型区域地面沉降模型。LS-MM 模型在长三角地区的成功应用表明该模型能用于模拟具有复杂变形特征的区域地面沉降问题。

中国地质大学(武汉)靳孟贵教授论述了土壤水流系统及其应用。定义了土壤水流系统是由水势场、介质场、水化学场、温度场耦合而成,在时空四维上不断演变的动态系统,可划分为土面蒸发、根系汇流和常年下渗子系统。以土壤水理论为指导,通过土壤水调控,使微地形、地膜覆盖或膜下滴灌与作物布局有机结合,可以协调土壤水分布和作物需水要求,提高作物产量和水分生产率。

中国科学院地质与地球物理研究所庞忠和研究员从 CO₂ 储埋能力评价的角度对我国渤海湾盆地深层咸水含水层中的区域地下水水流系统进行了研究。对含水层盖层的封闭性能进行了评价,介绍了现场 CO₂ 注入试验,并根据对含水层各参数的响应变化监测、取样数据进行了初步分析。

墨西哥国立自治大学 Joel Carrillo-rivera 教授介绍了区域地下水流边界条件以及在水资源管理中的应用。报告指出,要较好的阐述地下水系统,必须从水化学、水力学、植被和土壤学多个学科领域进行

相互验证,并以实例研究介绍了地下水流系统研究在管理水安全、地面沉降、洪水、土地利用等领域的工作。最后分析了气候变化对水流系统的影响。

中国地质科学院水文地质环境地质研究所陈宗宇研究员介绍了过度开采条件下华北平原第四系含水系统地下水年龄和流动模式的研究成果。首先介绍了华北平原地下水超采历史和水位下降情况。探讨了利用多种同位素确定地下水年龄的方法。综合应用多种同位素分析技术研究了华北平原地下水开采后的流动模式。

澳大利亚皇家墨尔本理工大学 Matthew Currell 博士以中国运城盆地研究区,介绍了应用地球化学方法确定区域水流和可持续利用的地下水资源。综合应用放射性碳 (¹⁴C)、稳定同位素 (¹⁸O, ²H, ¹³C, ¹⁵N) 及主要离子的地球化学特征,表明由于地下水过度开采,目前区域水流系统已经被根本改变,浅层地下水向深层渗漏。

吉林大学苏小四教授介绍了鄂尔多斯白垩系盆地地下水水化学演化的 C、Sr、S 同位素示踪研究。分析了地下水 ¹³C 及溶解无机碳演化、³⁴S 及溶解硫酸盐演化及 Sr 同位素及水岩作用。

中国科学院地质与地球物理研究所李国敏研究员从高放废物的地质处置问题入手,介绍了区域地下水流动数值模拟的最新技术方法,然后以甘肃北山—疏勒河—祁连山地区为例,应用数值模拟技术研究区域地下水流动系统。

加拿大麦吉尔大学 Tom Gleeson 副教授论述了人类活动作用下的区域三维地下水流系统。分析了三维地形地貌条件下地下水的流动模式,探讨了海岸带地下水脆弱性评价方法并讨论了地下水足迹的概念。

北京大学曹国亮博士介绍了华北平原地下水流模拟。分析了华北平原地下水流主要控制因素,地下水数值模拟评价了各向异性/非均值、上边界、海平面变化、古水文地质条件及地下水开采对流动模式的影响。

中国地质大学(武汉)张人权教授介绍了河北平原多期次地下水流系统的模式重建研究。报告指出,现今的河北平原第四系地下水流系统,乃是多个时期水流系统的时空四维集合体,而非同一时期的三维水流,并详细阐述了不同时期地下水流系统重建的依据。

中国地质科学院水文地质环境地质研究所王贵玲研究员介绍了中国北方地区地下水系统划分。报告首先简述了地下水系统理论的发展历史,然后提

出了地下水系统划分的原则和依据,并据此对中国北方地下水系统进行了划分。

3 体会与思考

区域地下水流理论研究盆地尺度上的地下水循环规律。盆地尺度地下水运动规律的研究可以追溯到 20 世纪 40 年代。Hubbert(1940)借助地下水流体势的概念分析了区域地下水流特征,明确提出区域地下水存在垂向流动,加深了人们对盆地地下水流动规律的认识。在此基础上,加拿大学者 Toth 于 1963 年研究发现盆地中可以发育局部、中间和区域 3 个不同级次的地下水流系统,各个水流系统具有相对独立的水动力学和水化学特征,创立了基于重力驱动的区域地下水流理论(Joth J, 1963)。Freeze&Witherspoon(1967)利用数值解研究发现,非均质各向异性介质中也可以发育地下水流系统,进一步完善了区域地下水流理论(Freeze, R. A, et al., 1967)。

20 世纪 80 年代,区域地下水流理论传入我国(张人权等, 2011),并被应用于分析我国典型区域的地下水流系统。近几十年以来,中国地质调查局先后组织和开展了我国各大盆地的水文地质调查工作,积累了众多数据和成果,为深入研究盆地地下水循环规律提供了丰富的实际材料,并应用区域地下水流系统理论对各盆地地下水系统进行了深入研究。如我国鄂尔多斯盆地,采用 Packer 定深取样技术,获取不同深度地下水水位、水温及水化学和同位素资料,综合利用水动力场、温度场、同位素与水化学分析和数值模拟等方法,识别并定量刻画了不同级次水流系统的空间分布,对区域地下水流系统的理论,尤其是大型盆地水流系统研究有了很好的实践与发展(侯光才等, 2006; Yin, L. H., et al., 2010)。

与传统水文地质学重视含水层介质特征的研究不同,区域地下水流理论注重地下水循环过程中的水动力过程,并认为地下水是一系列地质、生物、化学过程中的重要地质营力,其核心是确定不同级次地下水流系统的空间分布,可以揭示地下水各个部分的内在联系。因此,区域地下水流理论是推动区域或流域尺度,尤其是盆地尺度地下水循环规律研究的有力工具。区域地下水流理论较好地刻画了盆地尺度地下水的循环模式,是指导区域地下水研究

的有力工具,不仅在水文地质领域,而且在石油和矿产勘探、地热开采、核废料处置、生态水文以及环境保护等一系列地学领域得到了应用。因此,区域地下水流理论是现代水文地质学科的重要基础理论(梁杏等, 2012; Jiang, X. W., et al., 2012)。

随着经济社会的快速发展,大尺度区域地下水资源与环境问题日益得到重视,区域地下水流理论必将更加广泛地应用于水文地质环境地质相关研究领域。本次国际研讨会将对区域地下水流理论的研究起到积极的促进作用,将有力推动该理论的进一步发展和实际应用。

参考文献(References):

- 张人权,梁杏,靳孟贵,等. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社, 2011.
- Zhang Renquan, Liang xing, Jin Menggui, et al. Foundation of hydrogeology [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2011.
- 侯光才,林学钰,苏小四,等. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水系统研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2006, 36(3): 391-398.
- Hou Guangcai, Lin Xueyu, Su Xiaosi, et al. Groundwater System in Ordos Cretaceous Artisan Basin (CAB)[J]. Journal of Jilin University, 2006, 36(3): 391-398.
- 梁杏,张人权,牛宏,等. 地下水流系统理论与研究方法的发展[J]. 地质科技情报, 2012, 31(5): 143-151.
- Liang Xing, Zhang Renquan, Niu Hong, et al. Development of the Theory and research Method of Groundwater Flow System[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5): 143-151.
- Jiang, X. W., L. Wan, S. Ge, et al. A quantitative study on accumulation of age mass around stagnation points in nested flow systems, Water Resour[J]. Res, 2012, 48, W12502, doi:10.1029/2012WR012509.
- Toth J. A theoretical analysis of groundwater in small drainage basin [J]. Journal of Geophys. Research, 1963, 67 (11): 4375-4387.
- Freeze, R. A., Witherspoon, P. A. Theoretical analysis of regional groundwater flow. 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variation[J]. Water Resources Research, 1967, 3(2): 623-624.
- Yin, L. H., G. C. Hou, Z. P. Tao, and Y. Li, Origin and recharge estimates of groundwater in the ordos plateau, People's Republic of China, Environ[J]. Earth Sci., 2010, 60, 1731 - 1738, doi: 10.1007/s12665-009-0310-3.