

陈崇希教授的学术思想和成就综述

焦赳赳¹, 王旭升², 成建梅³, 裴顺平⁴

(1. 香港大学地球科学系, 香港; 2. 武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 湖北武汉 430072;
3. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074; 4. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 在地下水资源评价理论方面, 陈崇希教授分析了“平均布井法”不符合质量守恒原理的实质, 纠正了以“地下水补给量计算可持续开采量”的错误, 提出了基于“质量守恒”的地下水资源评价原则, 强调分析“补给的增加量与排泄的减少量”在评价地下水可持续开采量时的重要意义。在地下水动力学领域, 陈崇希教授纠正了稳定井流“影响半径”模型的错误, 恢复了 Dupuit “圆岛模型”的原貌, 拓展了 Theis 公式和 Hantush 公式的应用条件, 改进了地下水非稳定井流理论, 完善了其中的某些基本概念。在水文地质模拟仿真技术方面, 陈崇希教授提出确定滨海承压含水层海底边界的理论和方法; 提出地下水混合并流的模型和模拟方法, 解决了混合抽水试验确定分层水文地质参数的难题; 提出岩溶管道—裂隙—孔隙三重介质的地下水线性—非线性流动的模型; 建立了考虑井管水流雷诺数对滤管入流量分布的水平井—含水层系统的地下水流模型; 完成了“渗流—管流耦合模型”的砂槽物理模拟, 并用数值方法仿真了地下水流的规律; 最近向观测孔水位形成的传统观念——常规观测孔中的水头降深反映该孔滤水管中各点的平均降深——提出质疑。陈崇希教授建立的“渗流—管流耦合模型”使传统的基于线汇/线源的井孔—含水系统模型提高到新的水平。陈崇希教授积极倡导“防止模拟失真, 提高仿真性”, 强调精细地分析水文地质条件、合理地概化模型和采用正确的仿真技术的重要性。

关键词: 陈崇希; 学术思想; 地下水; 资源评价; 模型; 数值模拟; 井流问题。

中图分类号: P641 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)05-0471-12

作者简介: 焦赳赳(1963—), 男, 香港大学地球科学系副教授, 中国地质大学(武汉)兼职博士生导师; 1983, 1986 年在中国地质大学(武汉)获学士与硕士学位, 1993 年获英国伯明翰大学博士学位, 1994—1996 年在美国阿拉巴马大学从事博士后研究, 目前主要从事水文地质的教学与科研工作。

陈崇希先生是我国著名的水文地质学家, 在长达 50 年的科学研究和教育事业生涯中, 他辛勤耕耘、不断求索创新, 为发展地下水动力学理论、完善地下水资源评价方法和推进水文地质模拟仿真技术等做出了重要而独特的贡献。本文主要从 3 个方面进行回顾, 以期系统地总结陈崇希先生的科学思想和在有关学科领域中的建树。

1 在地下水资源评价理论方面的成就

1.1 纠正稳定井流“影响半径”模型的错误, 恢复裘布依“圆岛模型”的原貌

Dupuit 模型^[1]是地下水稳定井流最基本的模

型, 20 世纪 50 年代该模型由前苏联以“影响半径”模型传入我国, 作为地下水资源评价的主要基础沿用了数十年。当时, 欧美地区同样将 Dupuit 模型刻画为“影响半径”模型, 直至 1972 年, 著名学者 Bear^[2]在其著作《多孔介质流体动力学》中也还是如此提法。

1966 年, 陈崇希^①教授对“影响半径”模型提出质疑, 从理论上证明了该模型不仅在原假定的初始水头水平(地下水静止)条件下不可能形成稳定井流, 而且在初始地下水流动(存在补给的径流场)条件下也不都能形成稳定流。陈崇希先生依据水均衡原理严格证明了形成稳定井流的条件: “假如没有因抽水而得到补给量的增加或排泄量的减少, 那么影

^①陈崇希. 地下水动力学. 北京: 北京地质学院, 1966. 18—19, 96—97.

响范围将无限制地发展,达到整个含水层.只有当地下水抽水得到地下水的补给增量和排泄减量之和等于抽水量时,地下水才能形成稳定并流”.这正是正确评价地下水可持续开采量的基本准则.

1974年3月,陈崇希^②教授又进一步指出:“Dupuit 稳定并流方程的应用条件应是圆岛中的一口井”(后简称圆岛模型),而非影响半径模型,Dupuit 公式中的影响半径 R 应改为圆岛半径 R .这就从理论上纠正了 20 世纪 50 年代由国外传入的在我国影响深远的“影响半径”模型的错误.

陈崇希教授的科学见解在当时迅速得到响应.1975年,陈崇希先生应邀为中国地质科学院水文地质工程地质研究所以及来自国内各省市的同行学员阐述对 Dupuit 稳定并流模型的认识,系统介绍地下水非稳定并流的理论和方法.为此,陈崇希^③教授撰写了我国最早的一本系统阐述地下水不稳定并流理论的著作——《地下水不稳定并流计算方法》(受“文革”影响,直至 1983 年才正式出版).陈崇希教授还多次应邀到地矿部各省局、冶金部、水利部和高等院校讲学,并参加国家有关规范的修订工作.

此后几年间,陈崇希教授跑遍国内各大城市图书馆、情报所寻找 Dupuit 的原著,未果.直至 1981 年,从法国巴黎图书馆复印到 1863 年 Dupuit 的原著,才见到“庐山真面目”.原著所表达的正是陈崇希教授 1974 年提出的“圆岛模型”.陈崇希教授十多年执著追踪这一问题,不仅纠正了水文地质文献中长达一个多世纪的误传,证明了“影响半径”稳定并流模型的理论错误,而且在此基础上建立了地下水开采条件下的质量守恒方程,从而为正确评价地下水可持续开采量确定了基本准则.

1.2 提出基于水均衡原理的地下水资源评价原则

传统地下水资源评价的理论体系,受“影响半径”模型的误导,形成了一系列原则上错误的地下水资源评价准则和方法.例如,我国平原和盆地地区普遍采用的“平均布井法”——井距等于 2 倍“影响半径”——计算地下水的可采资源量,就是对“影响半径”模型的直接误用.

前苏联学者 Петушков^[4] 和 Протников^[5] 提出的“单位静储量法”在 20 世纪 60 年代影响十分广泛.“单位静储量法”认为:当地下水取水量 Q_p 小于

动储量(即地下水径流量 Q_f ,该断面以上的补给量 Q_r ——引注)时,地下水位才能稳定.在流量超过动储量的抽水中,静储量便减少.在任意时间段内抽出的水量都等于所抽出的动储量总量和静储量的减少部分($-\Delta V_s$),并表示为

$$Q_p = Q_f - \Delta V_s / t. \quad (1)$$

可见“单位静储量法”的基本观点,是用天然补给量确定允许开采资源——可持续开采量.这种地下水资源评价思想长期主导国内外水文地质界,至今仍然有深远的影响.

陈崇希^③[3,6~8]教授(1966)基于水均衡原理,建立了评价地下水可持续开采量的基本准则:“只有当开采量等于补给增量与排泄减量之和时,才可能形成地下水的稳定流”,这时的开采量才是可持续开采量.陈崇希教授给出了地下水开采量组成的普遍形式

$$V_p = \Delta V_r - \Delta V_d - \Delta V_s. \quad (2)$$

式中, V_p 为某时间段内的抽水总量, ΔV_r 为同期内补给量的增量, ΔV_d 为同期内排泄量的增量, ΔV_s 为同期内储存量(包括弹性储量)的增量.

当抽水尚未改变补给、排泄边界条件,即 $\Delta V_r = 0$ 和 $\Delta V_d = 0$ 时,应有

$$V_p = -\Delta V_s. \quad (3)$$

这时,“抽出水的总量全部来自储存量的消耗”.

当抽水已使地下水达到稳定流动,即 $\Delta V_s = 0$ 时,则要求:

$$V_p = \Delta V_r - \Delta V_d. \quad (4)$$

即“只有当补给的增加量与排泄的减少量之和等于抽水量时,才可形成地下水流的稳定状态”.

最近,美国学者 Bredehoeft^[9] 发表论文批评水文地质界:“水文地质界坚持一个观点,就是人们若能确定地下水系统的补给量,那么就能确定可持续开采的最大量.……,在和其他地下水专家讨论该专题时,他们并不理解这些概念”.Bredehoeft^[9] 接着用岛状含水层证明:“可持续开采量等于地下水的补给增量减去排泄增量”.这与陈崇希教授 1966 年论证的结论^①不谋而合.

1978 年,在全国第一届地下水资源评价学术研讨会上,作为大会第一位发言的陈崇希先生(题为“地下水资源评价的原则和勘探思想的探讨”^[8]),除了提出上述观点外,还意识到,地下水的可持续开采量并不像基于“影响半径”模型的“平均布井法”那么大,也不能简单地用补给量作为可持续开采量.尽管当时地下水资源供需矛盾还不十分突出,陈崇希教

^②陈崇希.地下水不稳定流计算,山东省革委会地质局第一地质队,1974.

^③陈崇希.地下水不稳定并流计算方法,武汉地质学院,1975.

授在报告的结论中就已预见性地指出:“从根据补给的增量和排泄的减量评价开采储量的原则来看,在一些补给的增量不大而排泄的减量又要付出相当代价的地区,人工补给看来是必要的措施,在规划阶段最好就给予考虑.关于与地表水体相联系的含水层系统的补给的增量或排泄的减量,则要视其目前及将来可能对地表水利用的程度来判断其代价如何.但是,从长远来看,必须把地下水资源与地表水资源统一考虑,因为它们之间经常是在互相转化着”^[8].陈崇希教授1978年基于水均衡原理提出的“人工补给”和“把地下水资源与地表水资源统一考虑”的思想,至今仍然是水资源管理中的2个重要课题.

陈崇希^③教授进一步强调:在评价地下水资源时,“既要重视地下水补给形式和补给量的调查,也要重视对排泄的研究;在资料的分析上,不能只考虑天然条件下的补给和排泄,更应研究开采之后补给和排泄在数量上的变化.没有这方面数量上的研究,允许开采量是无法做出正确评价的”.

陈崇希教授在20世纪60年代提出,并在70年代进一步阐述的这些科学观点,成为地下水资源勘查和评价的基本原则.

人类对地下水资源的不合理开采将导致地质环境的恶化,因此,针对地下水资源枯竭、地面沉降等地质环境恶化问题,也应首先从地下水资源评价的理论方面进行反思.陈崇希^[10]教授再次强调指出:“富水性”指标是一个被长期曲解的水文地质概念.“富水性”本应是含水层导水性和补给条件的总和,2个因素缺一不可.然而长期以来人们以井孔的单位降深流量 q 作为富水性的具体指标,其理论根源就是“影响半径”模型,单位降深流量计算公式的基础就是Dupuit公式.实际上,在有限时间内做抽水试验所获得的单位降深流量主要反映的仅仅是含水层的过水能力.基于这个误解,人们往往选择所谓“富水性”强,实为导水系数大但补给条件差的深部承压含水层作为地下水的开采层位,其结果必然是得不到必要的补给增量和排泄减量与开采量相平衡,而导致地下水水头的大幅度下降、地下水资源枯竭乃至地面沉降等地质环境恶化.

陈崇希先生一直强调非稳定井流与稳定井流的本质区别.传统地下水资源评价正是以被误解了的Dupuit“影响半径”稳定井流理论为主要依据,它夸大了地下水的可持续开采量.评价地下水资源可持续开采量,必须正确地把握非稳定井流的原理和方

法.鉴于此,陈崇希教授长期致力于非稳定井流的基本原理、计算方法和地下水流动问题的数值模拟方法等领域的研究.

2 对地下水动力学解析理论的贡献

地下水井流问题分稳定井流和非稳定井流,前者的基本模型是Dupuit模型,后者是Theis模型.对于前者,陈崇希教授的主要贡献是纠正了“影响半径”模型的错误,恢复了“圆岛模型”的原貌(详见前文1.1节).下面综述非稳定井流有关问题.

2.1 拓宽Theis公式和Hantush公式的应用,改进非稳定井流理论

Theis模型^[11]是地下水非稳定井流最基本的模型,也是高度概化的模型.其中的一个假定是,初始水头水平分布,即初始地下水处于不流动状态,这种条件在自然界是很难满足的.1975年,陈崇希^③教授证明:Theis降深公式可直接用于初始渗流场为稳定流的情况;当初始渗流场非稳定(水头存在天然动态)时,抽水期间的地下水水头降深是天然水头动态降深和抽水自身引起的降深两部分贡献的总和,可以将抽水期间观测的地下水水头降深进行天然水头动态校正之后使用Theis公式.陈崇希教授进一步把这种关系推广到有越流的Hantush模型^③.这一研究成果拓宽了上述两基本公式的应用范围.此外,Theis模型要求井径趋于零,1975年,陈崇希教授证明^③^[3]:对于实际的有限井径,只要经过很短的抽水时间(一般小于1s)即可使用Theis公式.

在推广非稳定井流计算方法时,国内外曾流行用Theis公式确定“影响半径”,认为水头降深 s 近似等于零处的径距 r ,就是影响半径 R ,推导出“影响半径”的计算公式.陈崇希^[3]教授明确地指出,这样做违背了Theis公式近似表达式的基本应用前提,其实质是混淆了非稳定井流与稳定井流的本质区别,前者动用了地下水的储存量,而后者则不再动用储存量,因为此时已有“补给的增加量与排泄的减少量之和等于抽水量”使之平衡.

1974年,陈崇希教授在研究我国华北某矿坑涌水量的计算方法时,提出了层状非均质含水层地下水承压一无压不稳定井流的解析解,其中考虑了含水层导水系数随时间的变化^[12].在此之前,Moench和Prickett^[13]把热传导类似问题(导管周围的冻结或融解问题)的解直接移植用于承压一无压不稳定井

流问题,但涉及的是均质含水层,而且假定“含水层的原始厚度如此之大,以致无压区地下水位的降低不会明显减少导水系数”。陈崇希教授将此问题的解答推进了一大步。

20 世纪 70 年代中后期,陈崇希教授发现,承压含水层抽水试验的初期,实测水头降深往往大于 Theis 模型的理论值,陈崇希和吴修义^[14]指出:“这是由于 Theis 公式本身的缺陷所造成的。作为含水层的顶板,尤其当它为胶结的岩石时,由于它的力学性质,可作为‘梁’而承受一定的压力,从而含水层中水头的下降并非全部用来压缩含水层自身。看来,这也是造成理论曲线与实测数据不一致的另一原因”。2002 年,陈崇希教授再次深入研究这一问题,与研究生合作提出了考虑承压含水层顶板弯曲的修正 Theis 井流模型并得到解析解^[15],从理论上证明 Theis 模型预测抽水初期的水头降深偏小,从一个侧面改进了地下水非稳定井流理论。

2.2 深化基本概念,补充地下水运动解析理论

1966 年,陈崇希教授独立地建立了孔隙介质和裂隙介质渗透系数的水力学方程^①^[18]。这一成果揭示了水文地质学中最主要参数——渗透系数的物理实质。1972 年 Bear^[2]提出了与陈崇希先生相同的多孔介质渗透系数水力学方程,1967 年法国学者 Louis^[16]也提出了类似的裂隙介质水力学模型。

同地下水运动的基本微分方程一样,边界条件对地下水的运动规律起着控制性的作用。陈崇希等^[18]在研究潜水运动理论时,发现 Boulton^[17]的三维潜水井流模型和 Bear^[2]的《多孔介质流体动力学》对潜水面边界条件的数学描述存在错误,进而推导出严格的控制方程。为此,陈崇希教授直接或间接地与国内外有关专家(包括 Bear 在内)交换了意见,得到了一致确认。

在岩溶泉流量的衰减方面,国际上多用含有衰减系数 α 的负指数函数进行分析和预测,但该系数一直作为经验参数来使用。1988 年,林敏和陈崇希^[19,20]两位教授合作,采用解析法分析了岩溶泉流量的衰变特征,不仅获得了层流(线性流)状态,而且获得了紊流(非线性流)状态衰减系数的水力学方程,得出衰减系数 α 的结构组成,从而揭开了该系数与含水层基本参数之间的关系。

20 世纪 70 年代,陈崇希教授把非稳定流解析法的理论和方法巧妙地与数值法结合起来,这种“数值—解析法”充分发挥了两种计算方法的优点,解决

了毛里塔尼亚首都伊迪尼水源地由于含水层存在岩性“天窗”补给造成纯解析法预测地下水开采动态的困难^[21]等问题。采用传统的有限元法和有限差分法,对抽水井水位的模拟存在明显的理论缺陷,模拟值与实测值相差很大,这种模拟结果将会误导地下水的预测与管理。然而,陈崇希等^④^[22]提出一种预测抽水井中动水位的“数值—解析法”,却取得了相当好的效果。用理想模型对比、检验,采用常规的有限元法模拟所得的抽水井水位降深值与实际值对比可差 3~4 倍,而经数值—解析法校正后的误差则小于 1%。另外,数值模拟中非自然边界的处理也是个难点,处理此问题没有通用的方法,陈崇希等^④^[23]采用“数值—解析法”处理非自然边界问题,在几个实例应用中也获得成功。

3 对水文地质模拟技术的发展

陈崇希教授一向重视当今地下水动态—地质环境演变预测最重要的方法——水文地质数值模拟的研究,为此投入了大量心血,提出了一系列新颖、严谨并能有效提高模拟仿真性的方法,对推动我国的水文地质数值模拟技术做出了许多重要贡献。

3.1 改进滨海地区承压含水层模型,提出确定海底边界的理论和方法

在滨海地区,承压水是重要的开采对象。然而,如何确定承压含水层向海底延伸的排泄边界,是一个长期困扰国内外水文地质学家的难题。在众多的滨海、海岛数值模型中,国内外大部分研究者都把海岸线作为边界,Nawang 等^[24]则人为地取某个延伸距离为其边界。原则上讲,在预测海水入侵和评价地下水可开采资源量方面,如果不能合理地解决这个关键的边界条件问题,数值模拟的结果是不可靠的。1986—1988 年,陈崇希等^⑤^[25,26]第一次承担滨海区(北海市)地下水资源评价时创造性地提出:可以运用地下水的潮汐效应确定滨海含水层的“等效排泄边界”和水文地质参数。陈崇希教授首先归纳了天然条件下地下水向海底排泄的几种基本方式,要区分这几种排泄方式,确定出排泄边界的位置,不

④陈崇希,方淑镇,万军伟.韩城水源地地下水资源评价,河南省宜阳县韩城勘探区供水水源勘探报告,煤炭部水源开发队,中国地质大学(武汉)水文地质工程地质系,1989。

⑤陈崇希,蒋健民,叶善士,等.滨海多含水层系统水资源评价及承压含水层海底等效边界研究——以广西北海市禾塘村水源地为例,广西地质矿产局,中国地质大学(武汉)水文地质工程地质系,1989。

进行海上勘探是很困难的.为此,陈崇希教授又提出“等效排泄边界”的概念,即在具有相同渗透阻力的前提下,将面状越流和混合类型的排泄方式转化为线状集中排泄方式,使其在陆区观测孔控制范围以内的水力计算是等效的.在此基础上,他进一步提出了运用地下水潮汐效应信息确定“等效排泄边界”和含水层参数的思路、技术路线和具体实施方法.这一系统而完整的确定海底边界的理论和方法在建立滨海、海岛水文地质模型上具有重要的理论意义和实践价值.1988年,陈崇希教授还指导研究生求出利用地下水潮汐效应确定承压含水层顶板向海底延伸距离的解析解^[27].

这一方法只需要利用陆区钻孔水位的波动资料和海水位波动资料,不要求进行海上钻孔,具有很强的可操作性.陈崇希教授将该方法引入到数值模拟技术中,与研究生合作在广西、海南、山东等地的多个水资源评价模型和三维流海水入侵模型中得到成功应用和发展^[28~34].广西北海市禾塘村水源地应用该方法确定了地下水允许开采量为 $5.83 \text{万 m}^3/\text{d}$ (以地下水分水岭水位高出海水位 40.0cm 作为安全线),该方案实施多年(到1992年)一直没有发生海水入侵现象,然而1993年以后,当地因故越界开采地下水,结果导致地下水分水岭消失,造成海水入侵.这一事例充分说明了上述方法的科学性和在实际应用的重大价值.

1997年陈崇希教授应邀去台湾讲学时介绍了这一研究成果.当时,台湾西部滨海平原曾做过多个地下水模型(采用美国MODFLOW软件^[35]),但都是取海岸线为其边界,模拟失真却不知如何解决.陈崇希教授在台湾成功大学和台湾大学所作的学术报告,获得了热烈的反响.如今这一方法在台湾的有关模型中已被引用.

3.2 把传统的基于线汇/线源的井孔—含水系统模型提升为“渗流—管流耦合模型”

自然界的含水系统,大部分具有多层性.对多层含水系统,长期以来只能采用层层止水、分层抽水试验求取水文地质参数,其工序复杂、费用昂贵.为增大出水量、简化工序和降低成本,人们普遍采用混合井开采地下水,甚至利用混合井做抽水试验.对于多层含水系统的观测孔,大多数也是混合的.因此,如何建立混合井的数值模型来求取各分层水文地质参数和预测各含水层地下水漏斗的发展,是近半个世纪以来水文地质学界一直关注的问题.目前国际上

流行的美国地质调查局软件MODFLOW,建议根据导水系数的大小人为分配混合井各含水层的抽水流量^[35].陈崇希教授从机理上证明了这种处理方法的失真性,并用实例表明其可能导致很大的误差^⑥^[36~38].

陈崇希教授深入分析了混合抽水井流的机理,认为可将混合井视为渗透系数很大的、贯穿含水层之间弱透水层的圆柱形透镜体,即将混合井—含水系统视为含有圆柱形透镜体的“特殊越流系统”.陈崇希教授提出混合井“等效渗透系数”的概念和数学描述,在此基础上建立了混合井的基本模型——“渗流—管流耦合模型”^⑥^[36~38],其中管流部分没有任何假定,包括从小雷诺数的层流状态到雷诺数超过10万的粗糙紊流状态全部5个分区.该模型关于各含水层进出抽水井的流量是解的结果而无须预先给定,也可以模拟混合水位.因此,它可以用于混合抽水试确定分层水文地质参数,也可以用来预测混合井开采形成的各含水层地下水降落漏斗的动态,解决了40多年未解决的水文地质难题.该模型已成功解决北海市龙潭水源地两层混合抽水试验确定分层水文地质参数^⑥及郑州市黄河“95”滩地水源地三层混合抽水试验确定分层水文地质参数等实例^[37],以及近期完成的2项我国西北干旱地区地下水开采动态预测.

岩溶水动态的复杂性为水文地质学者所共识.由前苏联著名学者 Баренблатт 等^[39]提出的裂隙—孔隙双重介质模型,对弱岩溶化含水系统地下水动态的刻画取得了重大进展,然而该模型却不能解决强岩溶化含水系统的非线性地下水运动.1995年,陈崇希^[40]进一步把“渗流—管流耦合模型”发展为“岩溶管道—裂隙—孔隙”三重介质的地下水“线性—非线性流动”模型,用于研究岩溶地下水流的规律,所作的理想模型逼真地再现了岩溶管道泉流量的特殊动态,突破了国外双重介质模型和线性管流模型的局限性.这一模型被成功地用于模拟广西环江岩溶强发育地区十分复杂的泉流量动态^[41].

对于低渗透性或薄含水(油)层,与垂直井相比,水平井有特殊的优势.水平井在油藏工程中已得到较普遍的应用.20世纪90年代以来,发达国家陆续开始将水平井技术应用到地下水开采、地下水污染

⑥陈崇希,蒋健民,林敏,等.地下水不稳定混合抽水的渗—管流耦合模型及其应用.科学技术报告88172K051,广西地质矿产局,1993.

治理工程,引起了水文地质、石油、环境、水利等领域专家的广泛关注。对水平井的分析,国内外基本上都采用线汇人为预先分配流量来刻画水平井管的作用,对于均质含水(油)层,多采用等强度线汇,个别采用等水头的滤管壁边界条件。然而,这种方法缺乏足够理论依据。近年来,陈崇希等^[42]采用“渗流—管流耦合模型”研究水平井—含水层系统的地下水流问题,同时考虑井管水流雷诺数对流量分布的影响,算例表明水平井既不是等强度线汇也不是等水头的滤管壁边界条件。

最近,陈崇希教授又向观测孔水位形成的传统观念提出质疑。美国著名学者 Hantush^[43]和前苏联著名学者 Боцевер 和 Веригин^[44]在对承压含水层非完整井流的研究中,都认为常规观测孔中的水头降深反映了该孔滤水管中各点的平均降深;美国著名学者 Neuman^[45]也认为,潜水三维流常规观测孔中的水头降深可视为滤管内各点降深的平均值。这种确定观测孔中水位的方法一直沿用至今,40 多年来未见异议。然而,陈崇希(2003)^[46]指出:这些计算观测孔水位(水头)降深的方法是缺乏物理基础的纯数学方法;从机理上讲,观测孔非“观测”孔(孔内发生“抽水”与“注水”),多层井(multilayer well)不一定要求有“多层”的条件,混合井并不“混合”(孔内有其自身的水头分布规律)。陈崇希教授澄清了某些似是而非的模糊概念,并指出用“渗流—管流耦合模型”才能真正对常规观测孔的水位进行“仿真”。观测孔水位(水头)是水文地质最基本、最重要的数据,这一问题的解决具有重要的理论意义和实用价值。

当前国际上对井孔—含水系统的模拟,基本上采用传统的线汇/线源方法,个别试探者或者假定抽水井内的水流为层流(线性流)状态(例如 Therrien 和 Sudicky^[47]),或者假定抽水井内的水流为粗糙紊流状态(阻力平方区,雷诺数大于 10 万),并假定井管无限长的稳定流(Tarshish^[48])。陈崇希教授研究表明,单一流态的假定不可能完整地刻画井孔—含水系统。

陈崇希教授(1993)提出的“渗流—管流耦合模型”和“等效渗透系数”在理论上已解决多个水文地质难题,也已用于几个实例,为完善研究的各个环节,近期陈崇希教授(2003)^[49]与美国德克萨斯州 A&M 大学地质与地球物理系詹红兵博士合作,在中国国家自然科学基金和美国国家科学基金资助下完成了“渗流—管流耦合模型”的砂槽物理模拟,并

用陈崇希教授提出的“等效渗透系数”方法模拟了此条件下地下水流的规律。结果表明,数值模拟的水头动态相当好地再现了物理模拟结果。为此,陈崇希教授从提出“渗流—管流耦合模型”和“等效渗透系数”的理论,到物理模拟的验证以及不同条件下应用中的进一步检验等各环节,前后花去了 10 年的时间。

陈崇希教授提出的“渗流—管流耦合模型”(1993)^⑤,替代了水文地质界传统的基于线汇/线源的井孔—含水系统的模型,即将井孔的边界从滤管壁面处移至井口,从而无需人为给定滤管壁面处的边界条件,只需真实地给定井口处的流量或水头。这样一来,就将 100 多年来惯用的井孔—含水系统的模型提高到一个新的水平。陈崇希教授卓有成效的工作,使我国在相关领域的科学研究走上了世界前列。

3.3 发展地下水开采—地面沉降模型,提出对策思路

陈崇希教授十分重视把水文地质数值模拟方法用于解决工程地质问题。在主持国家“九五”重点攻关项目“地面沉降形成机理与防治研究”专题^[50~52]时,他强调含“千层饼状”弱透水层的多层含水系统不宜用所谓的准三维流模型(其误差不是通常所说的小于 5%,而是超过 30%),应采用真三维模型刻画,并提出土层非线性固结变形与地下水流的耦合计算方法。为真实地模拟地面沉降与地下水开采间的关系,他提出“细分软土层”,使其所建模型细分为 23 个模拟层。该模型不仅真实地刻画了地面沉降滞后于地下水开采层水头动态的普遍规律,也客观地仿真了苏州市地面沉降中心与地下水开采漏斗不一致的事实。通过对苏州市地下水开采—地面沉降多年动态的数值模拟预测,陈崇希教授获得了地下水开采强度、压缩层厚度和地面沉降幅度三者的时空分布及三者间的相互关系。

结合地下水资源评价的正确原则,陈崇希教授提出^[10,50~52]:应将地下水开采层位上移到浅层含水层并采取以水平井为主的开采井模式,这样既可以尽量保障地下水的开采供给,又可以达到控制地面沉降的目的。而以往面对地面沉降问题,人们普遍采取“多采多沉,少采少沉,不采不沉”的消极思想。

3.4 积极倡导“防止模拟失真,提高仿真性”

在数值模拟技术的功能广泛被水文地质工作者所认识和普遍应用的时候,陈崇希教授关注的则是其应用质量。陈崇希特别强调:当前数值模拟的核心问题是防止模拟失真,努力提高仿真性^[53~57]。“模拟

失真是多方面的,其中最主要的是概念模型失真。一旦水文地质概念模型不能刻画研究区地下水的基本运动规律,其后的工作再精细,也不可能弥补建立概念模型的失误。因此,要高度重视水文地质概念模型的建立。然而,这个问题并没有引起水文地质数值模拟工作者的普遍重视。我们要避免对水文地质条件、地下水流动基本特征未加精细分析就摆出数学模型,这种模型的预测结果是难以令人信服的。“单纯地追求‘拟合’是不对的,只有在合理概化水文地质模型的基础上才有真正意义上的拟合。不仅建模要以水文地质条件为基础,而且整个模型识别过程是对水文地质条件的再认识”。“要更加精细地分析水文地质条件,合理地概化模型和采用正确的仿真技术”。正因为如此,我们十分强调对水文地质条件的正确分析和建模论证。“建模是需要论证的”。“模拟失真的另一方面是缺乏对水流机理的研究和相应仿真技术的研制,没有后者的技术支持,正确的模型也无法运行”。

20多年来,陈崇希教授在上述思想指导下分析水文地质条件,研究水流机理和仿真技术,编制了大量的数值模拟程序,完成了30多个实际模拟模型,从科学性和实用性两方面完善了水文地质数值模拟技术。

4 结语

回顾陈崇希教授从业的50年,处处可以感触到他发现科学问题的敏锐性、解决问题的智慧和敢于纠正前人错误、直面真理的勇气。陈崇希教授一向推崇学术争鸣,认为只有进行学术争鸣和交流,才能更好地促进学科的发展。陈崇希先生始终如一地坚持“求真、求实”的学术思想,锲而不舍、精益求精地寻求科学问题的解答。作为博士生导师,他时常教导学生“不仅要学会解决问题的方法,而且要培养发现问题和科学地提出问题的能力”。至今他已培养了41名水文地质专业高级人才。

陈崇希先生性格开朗、襟怀坦白,他对科学的热爱之情、对工作一丝不苟的科学家风范和对难题的攻关精神都深深地影响着他的学生和工作伙伴。现在,陈崇希教授70岁了,仍然精神抖擞地从事着他热爱的地下水科学研究,继续以敏锐的思维、深刻的洞察力和严谨的作风在孜孜不倦地工作。我们衷心祝愿陈崇希教授青春永驻、再出新知!

参考文献:

- [1] Dupuit A J E J. Etudes Theoretiques et Pratiques sur le Mouvement des Eaux [M]. Paris: Dunod, 1863.
- [2] Bear J. Dynamics of fluids in porous media [M]. New York: Amer Elsevier Publishing Company, 1972. 54—55.
- [3] 陈崇希. 地下水不稳定井流计算方法[M]. 北京:地质出版社,1983.
CHEN C X. Calculation methods of groundwater unsteady flow to wells [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983.
- [4] 彼图什科夫. 抽水试验与裂隙喀斯特水的动、静储量和开采储量计算的新方法[J]. 水文地质工程地质译丛, 1965, (5): 1—6.
Петушков К П. The new calculation methods by pumping tests for dynamic, static and exploitation water reserves in karst aquifers with fissures [J]. The Version of Hydrogeology and Engineering Geology, 1965, (5): 1—6.
- [5] 普洛特尼柯夫. 裂隙喀斯特水天然储量评价的“单位静储量法”[J]. 水文地质工程地质译丛, 1966, (1): 10—12.
Протников Н Н. “Unit static reserves method” for evaluating water resources in karst aquifers with fissures [J]. The Version of Hydrogeology and Engineering Geology, 1966, (1): 10—12.
- [6] 陈崇希. 评彼图什科夫和普洛特尼柯夫的“单位静储量法”——兼谈地下水资源评价中的若干问题[J]. 水文地质工程地质, 1978, (6): 82—86.
CHEN C X. Comments on К. П. Петушков and Н. Н. Протников’s “unit static reserves method”—talking about several issues of evaluating on groundwater resources [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1978, (6): 82—86.
- [7] 陈崇希. 彼图什科夫“单位静储量法”的基本论点错在哪里[J]. 勘察科学技术, 1985, (1): 35—37.
CHEN C X. What’s wrong with the essential point of К. П. Петушков’s “unit static reserves method” [J]. Site Investigation Science and Technology, 1985, (1): 35—37.
- [8] 陈崇希. 地下水资源评价的原则和勘探思想的探讨[A]. 见:地质矿产部水文地质工程地质研究所. 全国第一届地下水资源评价学术研讨会论文集[C]. 北京:地质出版社, 1982. 22—33.
CHEN C X. On the principle of groundwater resource estimation and exploration ideas [A]. In: Institute of Hydrogeology and Engineering geology of Ministry of

- Geology and Mineral Resources, ed. The corpus of the first national proseminar on estimating of groundwater resources [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1982. 22—23.
- [9] Bredehoeft J D. The water budget myth revisited: why hydrogeologists model [J]. *Ground Water*, 2002, 40 (4): 340—345.
- [10] 陈崇希. 关于地下水引发地面沉降灾害的思考[J]. *水文地质工程地质*, 2000, (1): 45—48.
CHEN C X. The thinking about groundwater withdrawal induced land subsidence [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2001, (1): 45—48.
- [11] Theis C V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage [J]. *Trans Amer Geophys*, 1935, 16: 519—524.
- [12] 陈崇希. 层状非均质无压含水层中地下水不稳定井流计算方法[J]. *地球科学——武汉地质学院学报*, 1981, (1): 222—228.
CHEN C X. The calculation method of groundwater nonsteadily flowing to wells in an inhomogeneous stratified aquifer [J]. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 1981, (1): 222—228.
- [13] Moench A F, Prickett T A. Radial flow in an infinite aquifer undergoing conversion from artesian to water table conditions [J]. *Water Resources Research*, 1972, 8(2): 494—499.
- [14] 陈崇希, 吴修义. 边界附近地下水不稳定井流试验数据分析方法[A]. *综合治理和利用矿床大面积地下水会议论文集*[C]. 北京: 煤炭工业出版社, 1979. 29—41.
CHEN C X, WU X Y. Analytical methods for pumping tests nearby boundaries [A]. *The scientific proceeding of integrative controlling and utilizing of mine groundwater in large areas* [C]. Beijing: Coal Industry Press, 1979. 29—41.
- [15] 王旭升, 陈崇希. 改进的 Theis 井流模型及其解析解——考虑含水层顶板的挠曲作用[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(2): 199—202.
WANG X S, CHEN C X. Analysis of modified Theis model on well flow: Considering bending of the confining stratum [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(2): 199—202.
- [16] Louis C. Stromungsvorgange in Kluftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Boschungen im Fels [D]. *Felsmech; Universitat (TH) Karlsruhe, Veroff Inst Bodenmech*, 1967.
- [17] Boulton N S. The drawdown of water table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation [A]. *Proceeding institute of civil engineers [C]*. London: [s. n.], 1954. 564—579.
- [18] 陈崇希, 林敏. *地下水水力学* [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
CHEN C X, LIN M. *Groundwater hydraulics* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.
- [19] Lin M, Chen C X. Analytic models of groundwater flowing to karst springs [A]. *Proceedings of IAH 21st congress [C]*. Gulin, China: [s. n.], 1988. 646—653.
- [20] 林敏, 陈崇希. 岩溶含水层中地下水向泉口流动的解析模型[J]. *中国岩溶*, 1988, 7(3): 247—252.
LIN M, CHEN C X. The analytical model of groundwater flow towards springs in a karst aquifer [J]. *China karst*, 1988, 7(3): 247—252.
- [21] 陈崇希. 用数值—解析法预测毛里塔尼亚伊迪尼水源地的地下水开采动态[J]. *水文地质工程地质*, 1980, (4): 8—13.
CHEN C X. Using analytical-numerical method to predict the groundwater exploited dynamics in the Yi Dini water resource field of Mao Li Tania [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1980, (4): 8—13.
- [22] Chen C X, Lin M. Groundwater resources evaluation of the intermountain valley for Hanchen area [A]. *Proceedings of 26th international association hydrogeologist (IAH) conference [C]*. Canada: [s. n.], 1995.
- [23] 陈崇希, 陈明佑, 陈爱光, 等. 矿坑涌水量计算方法 [M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1985.
CHEN C X, CHEN M Y, CHEN A G, et al. The calculation methods of mine water outflow [M]. Wuhan: Wuhan College of Geology Press, 1985.
- [24] Nawang W M, Y Kishi. Modelling of saltwater movement in multilayered coastal aquifer at Tanjung Mas, Malaysia [A]. In: Jousma G, ed. *Proceeding of international conference on calibration and reliability in groundwater modeling [C]*. Hague, Netherlands: IAHS Publ, 1990. 112—119.
- [25] 陈崇希, 林敏, 舒本媛. 滨海承压含水层等效边界——以北海禾塘水源地为例[J]. *水文地质工程地质*, 1990, (4): 2—4.
CHEN C X, LIN M, SHU B Y. The equivalent drainage boundary of a confined aquifer and its determination in coastal region: A case study in Hetang area of Beihai city, China [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1990, (4): 2—4.
- [26] Chen C X, Lin M. Numerical simulation of the coastal

- aquifers in Beihai city [A]. In: Kovar K, ed. Proceeding of international conference on calibration and reliability in groundwater modeling (ModelCARE'90) [C]. [s. l.]: [s. n.], 1990. 67—74.
- [27] Li G M, Chen C X. Determining the length of confined aquifer roof extending under the sea by tidal method [J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 123: 97—104.
- [28] Chen C X, Lin M, Li G M. Modeling of quasi 3-D ground water flow and studying of equivalent drainage boundary in Beihai peninsula, Guangxi [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 1992, 3(1): 105—115.
- [29] 陈崇希,林敏,万军伟,等. 滨海多层含水系统地下水开采—水环境系统若干问题[A]. 中国沿海资源工程环境系统与经济发展战略专辑[C]. 北京:地震出版社, 1993. 147—152.
CHEN C X, LIN M, WAN J W, et al. Issues on aquatic environment due to the groundwater exploitation in the coastal multi-aquifer system [A]. Special on China coastal resource engineering environment system and economic development strategy [C]. Beijing: Seismological Press, 1993. 147—152.
- [30] 艾康洪,陈崇希. 广西漫尾岛咸淡水界面运移剖面二维水质模拟研究[J]. 勘察科学技术, 1994, (6): 3—9.
AI K H, CHEN C X. The study for section 2-D water quality simulation in interface of salt water and fresh water in Manwei island, Guangxi [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1994, (6): 3—9.
- [31] 李国敏,陈崇希. 涠洲岛海水入侵模拟[J]. 水文地质工程地质, 1995, (5): 1—6.
LI G M, CHEN C X. The simulation for saltwater intrusion in Weizhou island [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1995, (5): 1—6.
- [32] 万军伟,陈崇希. 海南省洋浦港滨海水源地最大开采量确定方法研究[J]. 勘察科学技术, 1996, (6): 6—11.
WAN J W, CHEN C X. The research for method in determining the most exploitation volume of seaside water resource area in Yangpu harbor in Hainan Province [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1996, (6): 6—11.
- [33] Cheng J M, Chen C X. Three-dimensional modeling of density-dependent salt water intrusion in multi-layered coastal aquifers in Jiahe River basin, Shandong Province, China [J]. *Ground Water*, 2001, 39(1): 137—143.
- [34] 成建梅,陈崇希,吉孟瑞,等. 运用三维变密度潮汐效应模型确定滨海含水系统的海底等效边界——山东烟台夹河中下游地区为例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2003, 28(2): 225—231.
CHENG J M, CHEN C X, JI M R, et al. Determination of seaward boundary with three-dimensional density-dependent tidal effect model: By example of coastal aquifers in the Jiahe River basin, Shandong Province [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(2): 225—231.
- [35] McDonald M G, Harbaugh A W. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model [EB/CD]. Techniques of Water Resources Investigations 06—A1, U S Geological Survey, 1988.
- [36] 陈崇希. 地下水不稳定混合抽水的模型及模拟方法[J]. 地球学报, 1996, 17(增刊): 222—228.
CHEN C X. The model and simulation method for mixed pumping test and unsteady groundwater flow [J]. *Earth Journal*, 1996, 17(Suppl): 222—228.
- [37] 陈崇希,林敏. 地下水混合井流理论及其应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1998.
CHEN C X, LIN M. Groundwater flow model for mixed wells and its application [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.
- [38] Chen C X, Jiao J J. Numerical simulation of pumping test in multilayer wells with non-Darcian flow in the wellbore [J]. *Ground Water*, 1999, 37(3): 465—474.
- [39] Баренблатт Г И, Желтов Ю П, Кочина И Н. Обоснованных представлениях теорий фильтрации однородных жидкостей втрещиноватых породах [J]. ПИММ, 1960, 24: 825—864.
- [40] 陈崇希. 岩溶管道—裂隙—空隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(4): 361—366.
CHEN C X. Groundwater flow model and simulation method in triple medium of karst tube-fissure-pore [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(4): 361—366.
- [41] Cheng J M, Chen C X. Preliminary numerical study of karst groundwater flow in Beishan area [A]. Proceedings of 2nd international conference of future groundwater at risk [C]. Changchun: [s. n.], 1998. 65—66.
- [42] 陈崇希,万军伟. 地下水水平井流的模型及数值模拟方法——考虑井管内不同流态[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(2): 135—140.
CHEN C X, WAN J W. A new model of groundwater flowing to horizontal well and the numerical simulation approach [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(2): 135—140.

- [43] Hantush M S. Aquifer test on partially penetrating wells [J]. *Proc Am Soc Civil Engrs*, 1961, 87(5): 171—195.
- [44] Бочевер Ф М, Веригин Н Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения [M]. Москва Игостройиздат, 1961.
- [45] Neuman S P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table [J]. *Water Resour Res*, 1972, 18(4): 1031—1045.
- [46] 陈崇希. 三维地下水流中常规观测孔水位的形成机理及确定方法 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2003, 28(5): 483—491.
CHEN C X. Forming mechanism and calculating methods of the water level in a conventional observation wellbore on the condition of three-dimensional groundwater flow [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(5): 483—491.
- [47] Therrien R, Sudicky E A. Well bore boundary conditions for variably saturated flow modeling [J]. *Adv Water Resour*, 2001, 24(2): 195—201.
- [48] Tarshish M. Combined mathematical model of flow in an aquifer-horizontal well system [J]. *Ground Water*, 1992, 30(6): 931—935.
- [49] Chen C X, Wan J W, Zhan H B. Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well [J]. *Journal of Hydrology*, 2003 (in press).
- [50] 陈崇希, 裴顺平. 地下水开采—地面沉降数值模拟及防治对策研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001.
CHEN C X, PEI S P. Numerical simulation of land subsidence due to groundwater withdrawal and its prevention countermeasure [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001.
- [51] Chen C X, Pei S P, Jiao J J. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou city, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2003, 11: 275—287.
- [52] Pei S P, Chen C X, Jiao J J. Geological hazards related to groundwater exploitation—Land subsidence in Suzhou city, China [A]. In: Wang Y, ed. *Proceedings of the international symposium on hydrogeology and the environment* [C]. Wuhan: China Environmental Science Press, 2000. 546—552.
- [53] 陈崇希. “防止模拟失真, 提高仿真性”是数值模拟的核心 [J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(2): 1—5.
CHEN C X. “To prevent model loss in reality and improve model accuracy” is the key of groundwater numerical modeling [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 30(2): 1—5.
- [54] 陈崇希. 滞后补给权函数——降雨补给潜水滞后性处理方法 [J]. *水文地质工程地质*, 1998, 25(6): 22—24.
CHEN C X. “hysteresis recharge weight function” method: For solving the rainfall hysteretic recharge to the water table [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1998, 25(6): 22—24.
- [55] 陈崇希, 裴顺平. 地下水开采—地面沉降模型研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2001, 28(2): 5—8.
CHEN C X, PEI S P. The research on the model of groundwater withdrawal with land subsidence [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2001, 28(2): 5—8.
- [56] 陈崇希, 黎明, 刘文波. 单斜含水层—泉流系统概念模型研究 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(2): 140, 198.
CHEN C X, LI M, LIU W B. The research for the concept model of the single declining aquifers-spring system [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(2): 140, 198.
- [57] 陈崇希, 裴顺平, 王逊. 非完整河的数值模拟方法及建模中的若干问题——读“数值模拟方法在评价地下水资源时区内河流的处理方法”一文随笔 [J]. *勘察科学技术*, 1999, (4): 3—6.
CHEN C X, PEI S P, WANG X. The numerical simulated method of partial penetration river and problems in the establishment models [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1999, (4): 3—6.

Academic Thoughts and Achievements of Professor CHEN Chong-xi

Jiu Jimmy Jiao¹, WANG Xu-sheng², CHENG Jian-mei³, PEI Shun-ping⁴

(1. *Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong*; 2. *National Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 3. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 4. *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: Professor CHEN Chong-xi is an eminent quantitative hydrogeologist in China. Over his distinguished academic career of 50 years, Professor CHEN has made outstanding contributions to the advancement of hydrogeology in China. This article is a brief review of his academic thoughts and achievements. Professor CHEN's research has covered many aspects of groundwater hydrology, including fundamental concepts and approaches of groundwater resource evaluation, theories of transient groundwater flow dynamics and methodology of groundwater numerical modeling.

Like many scientists and scholars in China, Professor CHEN's academic ideas have been greatly influenced by literature first from former USSA and then USA. In 1970s, while most groundwater hydrologists in China overwhelmingly welcomed the new theory and concepts developed by overseas scientists and were very keen to apply them to solve local hydrogeological problems, Professor CHEN was probably one of the few who really scrutinize the theory and method very critically before using them. He challenged quite a few concepts and ideas that were widely accepted in the groundwater community but had no basis in fact. In the process of learning and challenging the traditional theories and methods, he also developed his own unique approach and style of solving groundwater problems in China.

For example, the "effective radius" calculated from the Dupuit equation assuming that groundwater is in steady state was widely used to design the number and pattern of wells in a well field. He pointed out that unsteady state flow prevails in real aquifer systems and the concept of "effective radius" on the basis of steady state groundwater flow theory is incorrect for most flow systems in reality. He clarified the misunderstanding of the Dupuit equation and believed that the Dupuit equation applies only for a circular aquifer bounded by a fixed head boundary such as a circular island in the middle of the sea. His speculation was confirmed by the original publication of Dupuit which was available in China only after 1981, Professor CHEN made contributions in unsteady state flow theory as well. By studying the basic equations and the superposition theory, he relaxed the assumption of horizontal initial water level for using the Theis and Hantush equations.

It was well accepted that the maximum recharge under natural hydrogeological conditions can be used to determine the sustainable groundwater resource. Professor CHEN challenged such an approach and demonstrated that sustainable groundwater development should be based on the increase in recharge or/and the decrease in discharge after the aquifer system reaches a new equilibrium under pumping condition. Unfortunately, the myth that the recharge prior to pumping is important in determining the magnitude of sustainable groundwater development still goes on in the groundwater community in the world.

Professor CHEN developed some creative and effective methods of numerical modeling for some special hydrogeological problems. For numerical simulation in coastal aquifers, he presented the "equiv-

alent boundary” theory to determine the offshore boundary of a confined aquifer with roof extending under the sea on the basis of analyzing by tidal data. He proposed the equivalent hydraulic conductivity approach to simulate the pumping test data from a pumping well in a multilayer aquifer system. By taking account the different flow regimes (laminar and turbulent flows, and the transition range), his approach can simulate the dynamic interaction between the aquifers via non-Darcian vertical flow through the wellbore. He also used the approach to study groundwater flow in a horizontal well and verified his model and approach by conducting laboratory tests in a sand tank model. He further extended this approach to handling the complex groundwater flow in karst aquifers by presenting a triple porosity model for karst aquifers consisting of pipes, fissures and a porous matrix. Recently, Professor CHEN has challenged the traditional thinking about the physical meaning of water level measured from an observation well. It has been well accepted that the water level in an observation well reflects the average hydraulic head in the aquifer profile that is occupied by the screened portion of the well. Professor CHEN has been conducting research to prove that the water level in the observation well penetrating several aquifers represents only the head of the upper aquifer, or more precisely, the uppermost point of the upper aquifer.

On the basis of his modeling experience over the last half century, he strongly believes that the most important element in numerical modeling is that the model designers should make every effort to ensure that a numerical model is an accurate representation of the actual processes occurring in the real aquifer system. The best way to achieve this goal is to analyze the hydrogeological conditions with great care, conceptualize the model in a rational manner and simulate the process using an appropriate numerical technique.

Key words: CHEN Chong-xi; academic thought; groundwater; resource estimation; model; numerical simulation; well flow problem.