

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.007

地下水人工补给井研究综述

李 伟,李砚阁,龙玉桥

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要:综述了国内外地下水人工补给井设计建设、模拟试验、井流计算等方面的研究现状。认为国外补给井设计技术已较为规范,国内还处于初步探索阶段。指出补给井试验以堵塞研究为主,补给井形态、优化布设等方向关注较少;补给井流模拟计算主要依靠抽水井流理论,变化水头情形下的补给井流缺乏合理的模拟计算方法。建议加强补给井规划、设计与施工的技术集成研究,开展补给井优化设计与数值模拟研究,合理预测补给效果,促进地下水人工调蓄工作。

关键词:地下水人工补给;补给井;规划设计;试验研究;井流模拟

中图分类号:P641.25 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2013)05-0410-07

A review of research on artificial groundwater recharge wells

LI Wei, LI Yange, LONG Yuqiao

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: A review of research on recharge well design, simulation and experimentation, and well flow calculation is presented in this paper. Recharge well design technology abroad has been standardized, and it remains in a decentralized exploratory stage in our country. More focus is placed on well clogging research but less on aspects of well patterns and optimization. Recharge well flow simulation relies mainly on pumping well flow theory. It lacks a reasonable simulation method for recharge well flow under special circumstances. It is suggested that more attention be paid to recharge well planning and technology integration, that optimization design and numerical simulation of recharge wells be carried out, and that the effect of recharge be properly forecasted in order to promote artificial groundwater regulation and storage.

Key words: artificial groundwater recharge; recharge well; planning and design; experimental study; well flow simulation

水井补给是人工补给深层承压水的主要方式之一,亦是人工直接补给潜水的最有效方式之一,当包气带存在弱透水层时更是如此。此外,在建成区、工业园区等人工建筑密集区实施地下水人工补给时,由于土地资源限制,地表补给方式通常难以实现,因此一般采用水井补给方式。笔者对国内外地下水人工补给井设计建设、模拟试验、井流计算等方面的研究进展进行了综述,指出当前研究存在的问题,并展望了地下水人工补给井的应用发展前景。

1 地下水人工补给井设计研究

1.1 补给井建设经验

补给井的规划设计因地制宜,区域性差异较大。Sivanappan^[1]给出了在印度建设补给井的一般设计原则:井孔直径为 50 cm,井管直径 20 cm,需要揭穿潜水含水层约 30 m,井管外填充级配良好的滤料层;在补给井顶部需要开挖 6 m×6 m×6 m 的过滤池,池内依次铺填磨圆砾石、碎石以及细砂;为了防止洪水入渗时气体阻塞,通常

收稿日期:2012-08-06
基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAB14B04);南京水利科学研究院基金(Y512002)
作者简介:李伟(1980—),男,山东广饶人,博士,主要从事地下水资源规划与人工调蓄研究。E-mail:liw@nhri.cn

需要在补给井口加装直径为 75 mm 的导气管。如果采用加压方式注水,通常需要用水泥对接近地表段的补给井进行封闭处理^[2]。Joseph 等^[3]指出,在美国加利福尼亚州建设补给井时,为了达到一定的补给能力,在补给水源经过适当处理条件下,补给井应部分揭穿含水层,这样也便于反抽洗井工作。如果补给水源未经处理,补给井应建设成包气带井形式,以便补给水在到达含水层以前能够流经足够远的距离,充分过滤净化。除非建设在高渗透性地层内,包气带井深通常约为 3 m。由于包气带井至少需要 3 m 的底层净化距离,因此地下水埋深至少要达到 6 m 才能采用包气带井形式。Mays^[4]指出,在普遍情况下包气带井井深为 10 ~ 50 m,直径为 1 ~ 2 m。美国环境保护署(EPA)给出的典型包气带井井深为 30.48 ~ 45.72 m,直径为 1.83 m。

为减缓堵塞影响,补给井应具有滤料层,滤料层厚度在 80 ~ 230 mm 之间,但这也因地而异。加利福尼亚州曼哈顿海岸的滤料层厚度为 600 mm,而在纽约长岛进行冷却水回灌时,最小滤料层厚度仅为 50 mm。另外,补给水源的氯化处理也有助于保护井壁,减少生物堵塞^[5]。根据堵塞发展程度不同,补给井需要定期抽水或者进行周期性机械与化学洗井以减轻堵塞影响,但是过度化学清洗也会导致补给井设备的腐蚀^[6]。

1.2 补给井规范编制

国外补给井建设规划与设计通常体现在综合性补给区建设规划或设计规范中。目前,欧美等地区的发达国家侧重于技术规范的凝练总结,印度、南非等发展中国家侧重于宏观规划编制工作。美国土木工程师学会(ASCE)^[7]的《地下水人工补给标准指南》概述了各类地下水人工补给工程建设中的关键环节,涵盖了补给井规划、设计、建造、运行维护及报废等多个方面,讨论了地下水人工补给中需要关注的技术、环境、法律及社会经济问题。虽然并没有详细阐述各类技术性问题,但系统阐述了地下水人工补给相关的各个环节,是地下水人工补给初期规划的重要参考依据。David 等^[8]阐述了 ASR 系统规划设计、建设技术、运行维护及相关水文地球化学问题,并重点论述了 ASR 系统建设技术和水质控制技术,为 ASR 系统建设提供了依据。Perez 等^[9]结合欧洲地下水人工补给工程建设运行情况,论述了地下水人工补给过程中的堵塞问题,包括堵塞过程、堵塞预防及治理、堵塞监测技术及预测方法。联合国教育、科学与文化组织有关人员^[10]总结了世界各国经验,摘录了不同补给类型的成功范例^[10]。印度为了推广地下水人工补给技术、增加区域地下水资源量,编制了全国地下水人工补给规划,确定了适合人工补给的地区。在农村地区,为充分利用丰沛的季节性降水,需要重点采用渗滤池、补给井等技术;在城市、丘陵及沿海地区,重点是雨水集蓄利用^[11]。此外,澳大利亚有关部门^[12]编制了《含水层储存与回采设计规范》,南非相关部门^[13]编制了《国家地下水人工补给战略》。各国不同地区的《暴雨径流最佳管理措施手册(BMP)》中,也常见类似补给井设计规范^[14-15]。

相比之下,我国地下水人工补给工程规划设计仍停留在科学研究阶段,较为系统的研究成果有:魏永纯等^[16]在总结国内地下水人工补给经验基础上,较为系统地归纳了浅层地下水人工补给方法、设计原则,总结了介绍了多种井型结构。田园等^[17]对黄淮海平原农业区和城市工业区地下水人工补给试验的各种典型成果和经验进行了总结。李砚阁^[18]系统归纳总结了国内外地下水库规划与建设经验,提出了我国地下水库建设区域性规划,研究了地下水库建设中的关键技术。目前,我国地下水人工补给工作还未形成系统的技术理论体系,既没有总体规划布局,也没有技术规范指导。

2 地下水人工补给井试验研究

为了解决地下水人工补给井工程建设、运行、维护过程中遇到的实际问题,原位观测与试验研究一直占据着地下水人工补给井研究领域的主导地位。在补给井工程调查研究方面,以色列开展了大量工作,成效显著^[19]。Harpaz^[20]对以色列补给井工程进行了总结,在参考大量前人研究报告的基础上,对补给井补给过程的水动力特征进行了描述,并研究了不同矿化度水的混合过程。由于实际补给井工程形式多样、目的不一,因此与之密切相关的试验研究会涉及雨洪资源利用、再生水净化、地面沉降^[21-23]与海水入侵治理^[24-25]、地表地下水联合调度^[26]等多个方面。补给井补给过程中的堵塞问题一直是研究重点,早期研究以野外数据观测分析为主^[27-28],随着扫描电镜等技术手段的发展,室内物理模型试验及以此为基础的微观堵塞机理研究逐渐兴起^[29-32],同时堵塞过程数学模拟研究也大量涌现^[33-35]。

国内补给井试验同样集中在堵塞问题。阎葆瑞等^[36]较早研究了人工回灌后引起的水质恶化及补给井堵塞问题,分析了水质变化及补给井堵塞的生物化学作用机理。吕宗宏等^[37]在黄水河开展了深井补源试验和淤积试验。黄修东^[38]采用室内砂柱试验详细研究了地下水人工补给过程中的物理及生物化学堵塞过程。

李璐等^[39]、路莹等^[40]采用室内砂槽、砂柱试验模拟了浊水入渗过程中的堵塞问题。在地下水人工补给技术试验研究方面,谢娟等^[41]在西安进行了自来水井灌试验,对回灌过程中的水质变化情况进行了分析。邵洪文等^[42]设计了室内砂槽试验,模拟了均质潜水含水层抽、灌地下水过程,并对水文地质参数进行了对比计算。白峰青等^[43]、贺屹等^[44-45]提出人工补给深层地下水的 SPD 系统,即首先利用地表水补给浅层含水层,再把经过浅层含水层过滤净化的地下水补入深层含水层;通过室内对比试验,发现 SPD 系统有效降低了补给井堵塞程度。Pi 等^[46]分析了北京高碑店“土壤-含水层”系统处理效果。周世海等^[47]对德州市地热水进行了加压真空回灌试验,得出回灌量与回灌压力的幂函数关系。张猛等^[48]针对利用再生水补给地下水问题,提出组合式强化井灌工艺,通过土壤柱模拟组合式强化井灌系统,并协同臭氧氧化工艺对城市再生水补给地下水进行了试验研究。刘巍等^[49]通过室内试验研究了城市再生水地下回灌后的水质变化,重点分析了土壤含水层处理系统(SAT)对再生水的净化效果。

3 地下水人工补给井流计算方法

3.1 解析法

一般而言,补给井的注水过程可视为抽水的反过程,因此补给井流计算通常采用抽水井流理论。抽水井稳定流理论以 1863 年 Dupuit 公式的提出为标志,经过 Thiem 等的发展,到 20 世纪 30 年代已基本建立。抽水井非稳定流理论以 1935 年 Theis 公式的提出为标志,经过 Boulton 等的发展,到 20 世纪 70 年代已基本建立^[50]。受到抽水井流理论研究的影响,注水井流理论研究并不多。Huisman 等^[51]给出了抽、注水井群共同作用下的稳定流解析解。在抽水试验难以开展地区,注水试验是测定水文地质参数的重要方法,这在一定程度上推动了注水井流研究的发展。Majumdar 等^[52]研究了承压含水层中注水量变化条件下的完整注水井流问题,同时考虑了井径及井损影响,应用 Duhamel 定理给出了上述井流问题解析解。Mishra 等^[53]采用分离变量法求解了承压含水层中变水头注水井流问题。在忽略注水井自身结构的前提下,空间源汇理论也通常用于补给井流计算,鲍戈莫洛夫等^[54]对此进行了系统总结,给出了多种情形下的解析解公式。Bouwer^[55]应用反向抽水井流理论研究了均一岩性下包气带井补给流量,并针对地下水位远低于包气带井底情形,给出了井内水深高于 10 倍井半径时的简化包气带井流计算公式。李旻等^[56]、王玉林^[50]建立了承压含水层循环抽、注水井流数学模型并求得相应解析解。在实际应用中,含水层补给井计算普遍采用 Dupuit 公式、Thiem 公式、Theis 公式等抽水井流公式^[57-59]。

3.2 数值模拟法

数值模拟模型中,注水井、抽水井可归结为源汇项参与水均衡计算,因此只需给定流量,即可实现井流模拟。伴随数值模拟技术的发展,将注水井、抽水井归结为源汇项成为模拟井流的主要方式,应用广泛的 MODFLOW WEL 程序包正是采用了这一方式^[60]。Majumdar 等^[52]认为基于源汇理论的水井概化方式可能是造成注水井理论研究缓慢的原因之一。国外近年开展的人工补给模拟研究中,无论是在山丘地区^[61]、滨海地区^[62]还是在半干旱地区^[63],仍广泛采用该模拟方式。国内也是如此,在济宁^[64]、莱州^[65]、大庆^[66]等地下水人工补给模拟研究中均采用这一方式。当补给井直径较大或为混合井时,采用源汇理论容易造成模拟失真。针对这一问题,一些学者在井流研究中引入了能更好描述实际井管形状的源函数法和面源汇法^[67-69]。陈崇希等^[70]、胡立堂^[71]、Chen 等^[72]提出了模拟多层混合抽水的“渗流-管流”耦合模型并逐渐推广应用;Mohamed 等^[73]、Qian 等^[74]也基于这一理论模拟了水平井流。周焱钰等^[75]针对 MODFLOW 处理承压含水层中混合开采井流量在各层分配上存在的问题,提出了流量权重迭代计算方法。雷宏武等^[76]对包括渗流-管流法、流量权重迭代法在内的多种混合井模拟方法进行了对比分析。高渗透系数法(HKW)是模拟井流的另一方法^[77],它将井孔描述为一个渗透系数很大的介质体,从而将井孔含水层耦合起来,该方法的应用条件之一是假定井的截面接近网格截面,其不适用于大尺度网格剖分模拟^[78]。对于大尺度有限差分网格不能真实模拟井内水位问题,通常应用 Thiem 公式校正^[79-80]。早期井流模拟研究中,Prickett^[81]将 Thiem 公式校正方法应用于电网络模型的井点处理,Peaceman^[82]据此提出了井指数(well index)校正方法。国内,陈崇希等^[83-84]依据不稳定井流理论,在考虑井周已形成拟稳定流的前提下,提出了正方形差分网格的井中水位校正公式,随后又相继提出了矩形网格和多边形网格的井水位校正方法。王旭升^[85]建立了考虑自流井周围含水层存贮量释放的矩形差分网格自流井校正模型。

4 存在的问题

- a. 欧美等地区的发达国家在补给井研究特别是 ASR 补给系统的规划设计、施工建设、运行维护等方面已较为成熟,相关技术规范也不断完善。印度、南非等发展中国家在区域性补给井规划编制、宏观战略制订方面也已开展了大量工作。相比之下,我国地下水人工补给井工作仍是以探索性建设为主,包括补给井在内各类工程构建技术仍以地方实践经验为主,缺乏科学性的总结归纳,一时难以大规模推广应用。
- b. 地下水人工补给过程中的堵塞问题严重影响着补给工程效益,因此与之相关的模拟试验一直是热点领域,且试验成果丰富。但对补给井形态、优化布设等研究方向关注较少,研究程度不深,针对补给井形态的物理模型试验与数值模拟尚不多见。
- c. 实际应用中,补给井流计算主要依靠传统抽水井流理论,但对于包气带补给井、不完整补给井、反滤补给井等常用井型的流量计算,抽水井流理论难以解决,因此上述各类补给井流计算问题仍有待深入研究。
- d. 应用源汇理论模拟抽水井引起的失真问题已被关注。虽然各类模拟技术、水位校正方法在不断发展,但对于补给井的模拟方式仍以定流量为主,即在数值模型中人为设定补给量,对于变化补给水头条件下的补给井流模拟缺乏合理的模拟方法。

5 结 语

地下水是我国重要的供水水源,地下水资源的开发保护日益受到重视,补给井是人工主动调蓄地下水资源的重要手段,但目前我国对补给井的相关研究较为薄弱。今后除需要继续开展补给井堵塞防治相关研究外,应加强补给井优化布设试验研究,提出适合再生水、雨洪水等不同水源补给的补给井结构、建设模式,同时应注重补给井模拟方法研究,研发能够合理反映补给井流动态过程的计算方法,从而实现补给效果的合理预测计算。在上述工作基础上,应加强补给井建设技术集成凝练,制定有关规范标准,促进地下水人工调蓄工作。

参考文献:

[1] SIVANAPPAN R K. Rain water harvesting conservation and management strategies for urban and rural sectors[C]//National Seminar on Rainwater Harvesting and Water Management. Nagpur:[s. n.],2006:1-5.

[2] Ministry of Water Resources Government of India. Master plan for artificial recharge to ground water in India[EB]. [2012-07-12]. <http://cgwb.gov.in/documents/MASTER%20PLAN%20Final-2002.pdf>.

[3] JOSEPH B, HANNON P E. Underground disposal of storm water runoff[EB]. [2012-07-12]. <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/TS80-218.pdf>.

[4] MAYS L W. Hydraulic design handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1999.

[5] BLOETSCHER F. Draft of the class V underground injection control study: salt water intrusion barrier wells information summary [R]. Florida: Florida Governmental Utility Authority, 1999.

[6] BOUWER H. Role of groundwater and artificial recharge in future water resources management[C]//Future Groundwater Resources at Risk. Proceedings of the Helsinki Conference. Wallingford Oxfordshire: IAHS, 1994:491-497.

[7] ASCE. Standard guidelines for artificial recharge of ground water[M]. Reston: ASCE, 2001.

[8] DAVID R, PYNE G. Aquifer storage recovery: a guide to groundwater recharge through wells[M]. 2nd ed. Florida: ASR Press, 2005.

[9] PEREZ P A, CARRERA J. Clogging handbook[R]. Spain: Technical University of Catalonia, 1999.

[10] GALE L. Strategies for managed aquifer recharge (MAR) in semi-arid areas[R]. Paris: UNESCO IHP, 2005.

[11] Central Ground Water Board Ministry of Water Resources. Guide on artificial recharge to ground water[R]. New Delhi: Central Ground Water Board Ministry of Water Resources, 2000.

[12] Natural Resource Management Ministerial Council. Australian guidelines for water recycling managed aquifer recharge[R]. Canberra: Natural Resource Management Ministerial Council, 2008.

[13] RICKY M, GIDEON T, PHILLIP R, et al. Artificial recharge strategy[R]. Pretoria: Department of Water Affairs and Forestry Water Research Commission, 2007.

[14] JAMES E M, BRADLEY M C, ERNEST P H, et al. New Jersey stormwater best management practices manual[R]. Trenton: New Jersey Department of Environmental Protection, 2004.

- [15] LISA C, SHARON G. Stormwater management manual for western australia[R]. Perth:Department of Environment of Western Australia, 2004.
- [16] 魏永纯, 伍军. 地下水人工补给与地下水库[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- [17] 田园, 张原秀, 孙雪峰. 黄淮海平原地下水人工补给[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [18] 李砚阁. 地下水库建设研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [19] BROWN R F, SIGNOR D C. Artificial recharge-state of the art [J]. Ground Water, 1974, 12(3): 152-160.
- [20] HARPAZ Y. Underground water storage experimental project: summary report [M]. Tel Aviv: Water Planning for Israel Ltd., 1968.
- [21] PHIEN N, GIAO P H, NUTALAYA P. Field experiment of artificial recharge through a well with reference to land subsidence control[J]. Engineering Geology, 1998, 50(1/2): 187-201.
- [22] GIAO P H, PHIEN W N, HONJO Y. FEM quasi-3D modelling of responses to artificial recharge in the Bangkok multiaquifer system[J]. Environmental Modelling & Software, 1999, 14(2/3): 141-151.
- [23] FINLAYSON D. An example of artificial recharge correction of subsidence[C]//BIZIER P, DEBARRY P. World Water & Environmental Resources Congress. Reston: ASCE, 2003: 1-7.
- [24] 谢兴华, 胡亚安. 荷兰与我国海水入侵治理比较分析[J]. 水利水运工程学报, 2009(2): 105-108. (XIE Xinghua, HU Ya'an. A comparative analysis of sea water intrush management in the Netherlands and China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(2): 105-108. (in Chinese))
- [25] LUYUN R, MOMII K, NAKAGAWA K. Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion[J]. Ground Water, 2011, 49(2): 239-249.
- [26] 汪熊麟, 胡淑琴, 籍传茂, 等. 地下水人工补给译文集[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [27] ROGER L T. Coarse filter media for artificial recharge[R]. Illinois: State Water Survey, 1968.
- [28] REBHUN M, SCHWARZ J. Clogging and contamination process in recharge wells[J]. Water Resources Research, 1968, 4(6): 1207-1217.
- [29] HARRIE T, VERDEL J D, ANTOINE G J. Well clogging by particles in dutch well fields[J]. American Water Works Association Journal, 2003, 95(8): 112-118.
- [30] FOX D M, BRYAN R B, FOX C A. Changes in pore characteristics with depth for structural crusts[J]. Geoderma, 2004, 120(1/2): 109-120.
- [31] WANTANAPHONG J, MOONEY S J, BAILEY E H. Quantification of pore clogging characteristics in potential permeable reactive barrier substrates using image analysis[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2006, 86(3/4): 299-320.
- [32] SKOLASINSKA K. Clogging microstructures in the vadose zone-laboratory and field studies[J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(6): 1005-1017.
- [33] KIM Y S, WHITTLE A J. Filtration in a porous granular medium; 1. simulation of pore-scale particle deposition and clogging [J]. Transport in Porous Media, 2006, 65(1): 53-87.
- [34] REDDI L N, XIAO MING, HAJIA M G, et al. Physical clogging of soil filters under constant flow rate versus constant head [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(3): 804-811.
- [35] GUIDO K. Mathematical modeling of fines migration and clogging in porous media[D]. Georgia: School of Mathematics, 2007.
- [36] 阎葆瑞, 董桂兰. 人工回灌地下水微生物生态与水质(以上海为例)[J]. 地质论评, 1985, 31(1): 70-78. (YAN Baori, DONG Guilan. Microbial ecology and quality of artificial recharge groundwater[J]. Geological Review, 1985, 31(1): 70-78. (in Chinese))
- [37] 吕宗宏, 吕荣莉. 地下水深渗井补源试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(5): 38-52. (LUY Zonghong, LUY Rongli. Experimental study on water recharge with deep recharge wells[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002, 22(5): 38-52. (in Chinese))
- [38] 黄修东. 地下水人工回灌堵塞特征及机理试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
- [39] 李璐, 卢文喜, 杜新强, 等. 人工回灌过程中含水层堵塞试验研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(6): 77-78. (LI Lu, LU Wenxi, DU Xinqiang, et al. Experiment research on aquifer clogging during artificial recharge of groundwater[J]. Yellow River, 2010, 32(6): 77-78. (in Chinese))
- [40] 路莹, 杜新强, 迟宝明, 等. 地下水人工回灌过程中多孔介质悬浮物堵塞实验[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(2): 448-454. (LU Ying, DU Xinqiang, CHI Baoming, et al. The porous media clogging due to suspended solid during the artificial recharge of groundwater[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(2): 448-454. (in Chinese))
- [41] 谢娟, 姜凌, 李泉. 地下水人工补给水质的研究——以西安市回灌为例[J]. 西安工程学院学报, 2002, 24(4): 67-72. (XIE Juan, JIANG Ling, LI Quan. The quality of artificially recharged groundwater taking artificially recharged groundwater in Xi'an as an example[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2002, 24(4): 67-72. (in Chinese))

- [42] 邵洪文,刘拴民,宋曙光.均质潜水含水层抽-灌水实验测求参数的对比[J].地下水,2003,25(2):68-70. (SHAO Hongwen, LIU Shuanming, SONG Shuguang. Contrast on measured parameters in pumping and pouring water experiment in homogeneous phreatic water aquifer[J]. Ground Water, 2003,25(2):68-70. (in Chinese))
- [43] 白峰青,卢兰萍,贺屹.深层地下水人工补给模式试验研究[J].河北建筑科技学院学报,2005,22(4):1-3. (BAI Fengqing, LU Lanping, HE Yi. Study on the experiment of artificial recharge mode for deep groundwater[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2005, 22(4):1-3. (in Chinese))
- [44] 贺屹.地面水-潜水-深层水(SPD)人工补给系统试验研究[D].西安:长安大学,2003.
- [45] 贺屹,彭翠华,刘燕.深层地下水SPD人工补给系统[J].地球科学与环境学报,2006,28(1):47-50. (HE Yi, PENG Cuihua, LIU Yan. SPD artificial recharge system of deep groundwater[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006,28(1):47-50. (in Chinese))
- [46] PI Yunzheng, WANG Jianlong. A field study of advanced municipal wastewater treatment technology for artificial groundwater recharge[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(6): 1056-1060.
- [47] 周世海,杨询昌,梁伟,等.德州市城区地热水人工回灌试验研究[J].山东国土资源,2007,23(9):11-14. (ZHOU Shihai, YANG Xunchang, LIANG Wei, et al. Study on geothermal re-injection experiment in districts in Dezhou city[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2007, 23(9):11-14. (in Chinese))
- [48] 张猛,成徐州,赵璇.再生水补给地下水的新方式:组合式强化井灌[J].清华大学学报:自然科学版,2009,49(9):118-120. (ZHANG Meng, CHENG Xuzhou, ZHAO Xuan. Artificial groundwater recharge with reclaimed water using enhanced direct injection well recharge system[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology, 2009, 49(9):118-120. (in Chinese))
- [49] 刘巍,刘翔,辛佳.再生水地下回灌过程中溶解性有机物的去除研究[J].农业环境科学学报,2009,28(11):2354-2358. (LIU Wei, LIU Xiang, XIN Jia. Removal of dissolved organic matter during groundwater recharge using reclaimed water[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009,28(11):2354-2358. (in Chinese))
- [50] 王玉林.承压地下水开采并流模型及其渗流理论研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [51] HUISMAN L, OLSHOORN T N. Artificial groundwater recharge[M]. London: Pitman Advanced Publishing Program. 1983.
- [52] MAJUMDAR P K, MISHRA G C, SEKHAR M. Coupled solution for forced recharge in confined aquifers[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(12):1351-1358.
- [53] MISHRA G C, MAJUMDAR P K. Unsteady solution for well recharge in a low diffusive aquifer[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2010, 136(12):870-875.
- [54] 鲍戈莫洛夫,阿里特舒里.人工补给地下水[M].赵抱力,穆仲义,吴金祥,译.北京:水利出版社,1980.
- [55] BOUWER H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering[J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10(1): 121-124.
- [56] 李旻,刁乃仁,方肇洪.单井回灌地源热泵承压含水层渗流解析解[J].山东建筑工程学院学报,2006,21(1):1-5. (LI Min, DIAO Nairen, FANG Zhaohong. Analytical solution of seepage flow in a confined aquifer with a standing column well[J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering,2006,21(1):1-5. (in Chinese))
- [57] 武汉水利水电学院.人工回灌条件下水文计算问题专辑[R].武汉:武汉水利水电学院,1975.
- [58] KALEDHONKAR M J, SINGH O P, AMBAST S K. Artificial groundwater recharge through recharge tube wells: a case study [J]. IE (I) Journal AG, 2003,84:28-32.
- [59] 俞建霖,龚晓南.基坑工程地下水回灌系统的设计与应用技术研究[J].建筑结构学报,2001,22(5):70-74. (YU Jianlin, GONG Xiaonan. Study on the design and the application of the groundwater recharge system in excavation[J]. Journal of Building Structures, 2001,22(5):70-74. (in Chinese))
- [60] 徐亚,胡立堂,仪彪奇.井孔-含水层系统数值模拟方法研究进展[J].水文地质工程地质,2011,38(4):26-31. (XU Ya, HU Litang, YI Biaoqi. Advances in numerical simulation methods of a well-aquifer system[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011,38(4):26-31. (in Chinese))
- [61] MAJUMDAR P K, RAM S, RAO P R. Artificial recharge in multiaquifers of a mountainous watershed[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(3):215-222.
- [62] MOHAMED K K N, REDA M E, ASHRAF H M G. Impact of desalination plants brine injection wells on coastal aquifers[J]. Environment Geology, 2008, 54(3):445-454.
- [63] TAMER A A, FAYEZ A A. Artificial groundwater recharge to a semi-arid basin: case study of Mujib aquifer, Jordan[J]. Environment Earth Science, 2010, 60(4):845-859.
- [64] 刘波.基于GIS的地下水人工回灌分析[D].南京:河海大学,2005.
- [65] 熊雪萍.基于海水入侵防治的地下水库含水层回灌数值模拟与研究[D].济南:山东建筑大学,2011.
- [66] 高淑琴,苏小四,杜新强,等.大庆西部地下水位降落漏斗区水资源人工调蓄方案[J].吉林大学学报:地球科学版,

- 2008,38(2):261-267. (GAO Shuqin, SU Xiaosi, DU Xinqiang, et al. Artificial regulation groundwater depression cone in west of Daqing[J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition, 2008,38(2):261-267. (in Chinese))
- [67] BABU D K, ODEH A S. Productivity of a horizontal well[J]. SPE Reservoir Engineering, 1989, 4(4): 417-421.
- [68] LIU X, ZHAO G, JIN Y C. Coupled reservoir/wormholes model for cold heavy oil production wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 50(3): 258-268.
- [69] CHENG Y, MCVAY D A, LEE W J. BEM for 3D unsteady-state flow problems in porous media with a finite-conductivity horizontal wellbore[J]. Applied Numerical Mathematics, 2005, 53(1): 19-37.
- [70] 陈崇希,蒋健民,林敏,等.地下水不稳定混合抽水的渗流-管流耦合模型及其应用[R].武汉:中国地质大学(武汉)环境地质研究所,1992.
- [71] 胡立堂.干旱内陆河地区地表水和地下水集成模型及应用[J].水利学报,2008,39(4):410-418. (HU Litang. Integrated model for surface water and groundwater in arid inland river regions and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(4):410-418. (in Chinese))
- [72] 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, 281(1/2): 163-175.
- [73] MOHAMED A, RUSHTON K. Horizontal wells in shallow aquifers: field experiment and numerical model[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(1/2): 98-109.
- [74] QIAN Jiazhong, ZHAN Hongbin, LUO Shaohe, et al. Experimental evidence of scale-dependent hydraulic conductivity for fully developed turbulent flow in a single fracture[J]. Journal of Hydrology, 2007, 339(3/4): 206-215.
- [75] 周焱钰,陈喜,唐仲华.非均质承压含水层分层流量及水位估算研究[J].中国农村水利水电,2008(12):35-38. (ZHOU Yanyu, CHEN Xi, TANG Zhonghua. Estimation of well flow discharge allocation among heterogeneous water-bearing strata and modification of well water level[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(12):35-38. (in Chinese))
- [76] 雷宏武,唐仲华,王俊,等.非均质承压含水层混合井数值模拟方法对比研究[J].水电能源科学,2010,28(2):47-49. (LEI Hongwu, TANG Zhonghua, WANG Jun, et al. Comparative study on numerical simulation method of multiaquifer wells in heterogeneous artesian aquifer[J]. Water Resources and Power, 2010,28(2):47-49. (in Chinese))
- [77] NEVILLE C J, TONKIN M. Modeling multiaquifer wells with MODFLOW[J]. Ground Water, 2004, 42(6): 910-919.
- [78] 王全荣,唐仲华,翟莉娟. MODFLOW 中两种模拟混合井流问题方法的耦合[J].水文地质工程地质,2010,37(3):23-26. (WANG Quanrong, TANG Zhonghua, ZHAI Lijuan. The improved approach coupling two methods in MODFLOW to simulate a multiaquifer well[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010,37(3):23-26. (in Chinese))
- [79] ANDERSON M P, WOESSER W W. Applied groundwater modeling, simulation of flow and advective transport[M]. London: Academic Press, Inc, 1992.
- [80] 薛禹群,谢春红.地下水数值模拟[M].北京:科学出版社,2007.
- [81] PRICKETT T A. Designing pumping well characteristics into electrical analog models[J]. Ground Water, 1967, 5(4):38-46.
- [82] PEACEMAN D W. Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1978, 18(3):183-194.
- [83] 陈崇希,唐仲华.地下水流动问题的数值方法[M].武汉:中国地质大学出版社,1990.
- [84] 陈崇希,王旭升,胡立堂.地下水数值模拟中抽水井水位的校正[J].水利学报,2007,38(4):481-485. (CHEN Chongxi, WANG Xusheng, HU Litang. Emendation of drawdown in pumping wells for numerical modeling of groundwater flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(4):481-485. (in Chinese))
- [85] 王旭升.自流井有限差分模拟的校正模型[J].地球科学:中国地质大学学报,2008,33(1):112-116. (WANG Xusheng. Revised model for finite difference modeling of flowing artesian wells[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008,33(1):112-116. (in Chinese))