

井孔 - 含水层系统数值模拟方法研究进展

徐 亚, 胡立堂, 仪彪奇

(北京师范大学水科学研究院, 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 目前“井孔 - 含水层”系统处理的三种主要方法: 基于线汇理论的井孔模拟、高渗透系数法和渗流 - 管流耦合模型, 评述了各种方法的优缺点, 重点指出了传统线源(汇)法理论上的缺陷及实际应用中的局限性。概括了 MODFLOW, TOUGH2, FEFLOW 等地下水数值模拟软件对井孔含水层模拟的方法; 应加强井周小尺度水流水质的精细研究, 并研究井周水流运动对水质的作用, 以及对大尺度地下水模拟的影响。

关键词: 井孔 - 含水层系统; 数值模拟; 线汇; 等效渗透系数; 渗流 - 管流耦合模型

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)04-0026-06

井孔内部及其周边水流、溶质迁移的研究一直是井孔水力学面临的难点问题。1935 年 Theis 提出不稳定井流的数学模型, 之后美国学者 Jacob 根据渗流场与温度场的相似性, 将热传导的数学理论应用到地下水研究中, 建立了不稳定井流的解析解, 至此, 井流问题逐渐得到重视, 并被广泛研究。国内学者陈雨荪^[1]围绕单井的各类水力学问题进行了大量解析解的推导, 为国内地下水井流运动的模拟提供了基础。但当时关注的重点是井孔可提供的涌水量, 对井中及周围流场缺乏深入细致的研究。随着井孔建筑物在生产实践中的大量应用, 井的功能已经不仅仅局限于“挖井取水”这一单纯目的, 还有其它种种用途, 如用来采样的井, 用于石油开采的油藏井, 用于地下水源地水质动态监测的监测井, 以及其他用于地下水污染修复的处置井, 用于油气勘测的各类井。鉴于井孔提供的水位和水质信息的重要性, 应比以往更合理更精细地模拟井孔及其周边水流(水质)的静态分布和动态变化。

井孔是地下水水流水质模型经常遇到的模拟对象和开采对象, 但目前讨论较多的多孔介质渗流问题, 很少细致考虑井孔的存在对溶质运移的影响, 这种影响在小尺度、微观的井孔 - 含水层模拟中体现得更为明显。井孔 - 含水层系统模拟存在很多困难, 面临的主要问题有: 井周精细剖分的计算问题、井损对井孔周边水头分布的影响、井孔 - 含水层系统中多种流态的刻

画、混合井中的各层水头(或流量)的分配以及井孔的存在对水流和水质运移的影响。针对这些问题, 国内外学者做了许多深入的研究并提出了井孔 - 含水层模拟的多种方法, 本文将针对井孔 - 含水层系统的数值模拟方法进行总结和评述, 并对存在问题进行分析, 为将来更好模拟井孔 - 含水层系统提供参考。

1 井流 - 含水层系统的多种处理方法

在目前的地下水模拟中, 最普遍的处理办法就是将井管视为内边界, 沿井孔轴线(或井壁)赋予流量值。其它方法还包括有高渗透系数法和渗流管流耦合模型, 下面分述之。

1.1 线源汇理论

野外试验和理论研究数据^[2~5]表明, 线源汇理论处理井流 - 含水层系统存在问题。首先由于抽水时水流逐渐向泵口积聚, 愈靠近井管水流断面愈小, 按照流量平衡方程, 过水断面越小流量越大, 因而抽水时流量并不是沿井壁均匀分布的。其次对于观测井而言, 地下水井中和井周地下水普遍存在流动^[5], 滤管一部分出水(正值)一部分进水(负值), 若按照导水系数分配则会得出正值(导水系数比值)等于负值(流量比值)的荒谬结论。

Park 和 Zhan^[6~7]等人对水平井的物理模型模拟表明水平井有限井径仅影响初始时刻的降深, 当抽水时间足够长时此效应变得可以忽略。因此在水平井流量不大时采用线源汇较为合理。万军伟等^[8]对水平井巨型砂槽模型的研究也表明在水平井管中的水流全部为层流($Re < 2\ 320$)或者是层流和层流 - 光滑紊流过渡区($Re < 4\ 000$)同时并存的情况下, 利用线源(线汇)理论模拟的结果比较满意; 当水平井管中出现光

收稿日期: 2010-09-20; 修订日期: 2010-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872159)

作者简介: 徐亚(1985 -), 男, 硕士生, 研究方向为地下水数值模拟研究。

通讯作者: 胡立堂, E-mail: litanghu@bnu.edu.cn

滑紊流区 ($Re > 4\ 000$) ,即同时有层流、层流 - 光滑紊流过渡态和光滑紊流或更多种流态时 ,该解析解已不再适用 ,此时必须利用井孔 - 含水层耦合模型进行求解。

在解析解中 ,等流量边界代替等水头边界可简化数学模型的求解。Rosa 等^[9]研究了等流量和等水头两种边界条件的适用性 ,并认为在一定条件下可用等流量边界代替等水头井壁的假设。詹红兵等^[10]也得出类似结论 ,并进一步指出当观测点到井壁的距离大于井径的 25 倍时 ,用等流量和等水头假设所得的结果相差不大于 5% ,两者可以通用。

将井孔处理为混合边界的方法最早是由 Hantush 提出的。近些年来 ,国外已有不少学者^[11~12]利用这种处理方式进行过非完整井的模拟研究。但该方法在进行数值计算时对 CPU 的计算能力要求很高。相比于竖直井 ,水平井与含水层(油藏)的接触面积更大 ,因而能大大提高井的产量 ,同时有效的解决水或油锥进的问题。但由于水平井 - 含水层系统中水流形状的三维不对称性使得在地下水数值模拟中 ,水平井的模拟尤为困难。用混合边界的处理方法来处理水平井 ,其计算量更会显著增大。

基于线源(线汇)理论的数值模拟方法在井孔直径或流量较小时能取得比较好的结果 ,但当井孔直径或流量较大时 ,容易使井中水流偏离线性流的影响 ,从而导致模拟结果失真。为此 ,一些学者在井流研究中引入了能更好地描述实际井管形状的源函数法和面源(汇)的方法。源函数法的基本思想是将源函数和几何函数分解 ,然后利用纽曼定律对源函数在时间和空间上积分 ,从而求出整个井孔的水流分布。国外学者 Babu 等^[13]基于源函数法建立了长方形、零流量边界储层的数学模型 ,给出了模型的解析解和数值解 ,并利用该模型研究了储层中各种井孔(竖直井、水平井、斜井和混合井)的瞬态流问题。Liu^[14]将该模型与井孔水力学模型耦合研究了水平井的涌水量问题。但他们的模型只能应用于具有同样几何形状(长方体)和边界条件(零流量边界)的含水层模拟。

另一个能较好反应实际井管形状的方法是 Cheng^[15]开发的基于边界元法的面源(汇)模型。该模型将井孔处理为更接近其物理实际的圆柱状的面源 ,因而能较准确的模拟水头动态。利用边界元法处理井孔的另一个优点是可以灵活的处理各种外边界条件和任意方向的井孔(竖井、斜井和水平井等)。但是由于边界元法解非线性问题时 ,会遇到同非线性项相对应

的区域积分 ,这种积分在奇异点附近有强烈的奇异性 ,使求解遇到困难。由此 ,这种方法难以将井管处理为混合边界 ,这从某种程度上制约了边界元法在“井孔 - 含水层”系统模拟中的应用。

1.2 高渗透系数法

基于线源(汇)理论的井孔含水层模拟虽然在求解上有其方便之处 ,但人为赋予井壁水头(流量)的处理方法降低了模型仿真性 ,同时也没有考虑井孔内多种流态和井损的影响。高渗透系数法将井孔描述为一个渗透系数(一般是垂向渗透系数)很大的介质体 ,从而将井孔 - 含水层耦合起来。

HKW(High Kv in Wellblock) 是 MODFLOW 的一个井流程序包 ,该方法将井孔和含水层联合剖分 ,然后赋予含井孔的网格一个较大的垂向渗透系数。相对于源(汇)理论 ,该方法的最大的改善是避免了人为赋予井壁水头(流量)的难题 ,同时对于井孔附近水流是否是轴向流也没有严格限制。该模型的应用条件之一是假定井的截面接近网格截面 ,而当井孔和井网格大小相差太大时(这种情况在大尺度的流域或盆地级地下水模拟中经常遇到) ,井孔流量模拟值远小于真实值。王全荣等^[16]的研究也证实了这一缺陷 ;另外该方法仅考虑了井孔水流为层流时的等效渗透系数 ,而实际的地下水模拟中经常会出现多种流态并存的情况。

1.3 渗流 - 管流耦合模型

“渗流 - 管流耦合”模型最初由陈崇希教授提出 ,最先应用于广西北海市龙潭两层混合抽水试验场^[4~17]求取水文地质参数 ,随后应用于干旱内陆区地下水系统模拟^[18]和水平井研究^[19]中 ,并取得了较好的效果。Mohamed^[20]、Qian^[21]等也基于渗流 - 管流耦合模型模拟了地下水的水平井流实例。该模型是从流体力学圆柱管中水流的水头损失方程出发 ,将层流、紊流及其过渡流态概化成类似达西定律的等效渗透系数 ,从而将管流流动规律转变成统一方程 ,将 5 个流态分区的流动规律统一为达西定律形式。该模型同时深入分析了观测井的水流 ,考虑了井孔的井筒效应 ,即由于观测井三维流的存在使得一部分滤管进水(抽水)另一部分滤管出水(注水) ,从而导致井孔水头的再分配 ,也影响了孔周的流场和水质分布 ,即使在均质单一含水层中这种地下水流也体现出三维特点 ,呈现“多层”性 ,这即是渗流 - 管流耦合模型研究的重点内容。王全荣^[16]等的研究表明对于大尺度的地下水模拟问题 ,渗流 - 管流耦合模型能更准确地描述井管内部及其附近的水流条件。

2 常用数值模拟软件的处理方法

国际上较有影响力的地下水数值模拟软件主要包括:MODFLOW 系列软件、FEFLOW、GMS、TOUGH2。我国自主开发的地下水数值模拟软件极为缺乏,就笔者所知目前仅有 PGMS。下面主要对 MODFLOW 系列、FEFLOW、TOUGH2 及 PGMS 对井流含水层系统的处理进行评述。

2.1 MODFLOW 系列软件

以 Visual MODFLOW 为例,说明其处理方法。Visual MODFLOW 中可用于井流模拟的程序包有三个:MODFLOW 井流子程序包(WEL),井筒高渗透体法(HKW,High Kv in Wellblock)和 MODFLOW 混合井包(MAW1,Multi-aquifer Well)。WEL 包是线源(线汇)理论的直接应用,即对于单层井,直接赋予抽水流量或井口水头,对于混合井,按每层的导水系数大小人为分配各层流量。MAW1 包是由 USGS(美国地质调查局)开发的混合井包,在网格加密/不加密,抽水/不抽水条件下,该井包的模拟结果都能达到较高的精度,因此对于大尺度地下水模拟而言,混合井包是一个很好的选择。井筒高渗透体法(HKW)的介绍详见 1.2 节。

2.2 FEFLOW

早期版本的 FEFLOW 对井管的模拟与 MODFLOW 井流子程序包类似,即对于单层井,按井口流量(水头)赋值,对于混合井,按各层导水系数分配各层流量。在 FEFLOW 5.3 及其后续版本 FEFLOW 5.4 及 FEFLOW 6 中,井流模拟除了可选用传统的“导水系数分配法”外,又加入了离散特征单元模块(DFM,Discrete Feature Element)。在这个模块中,用户可利用一维线元模拟井管、河流渠道,利用二维线元处理裂隙、断层的渗流和坡面漫流;同时对于不同的离散单元,可以灵活选用不同的流体运动方程(Darcy、Hagen-Poiseuille 和 Manning-Strickling)。DFM 法能较好地处理各种复杂地质单元(裂隙、井管和岩溶管道等),国际上已有许多研究者利用 DFM 法做过模拟。如 Meyer 等^[22]在模拟佛罗里达东部的地下水时,利用 DFM 法处理了岩溶管道;Kincaid 等^[23]在研究佛罗里达上游含水层时利用 Manning-Strickler 和 Darcy 方程分别描述管道水流和水力传导系数较小的孔隙介质。目前,从国内期刊中还没有检索到利用 DFM 法模拟井孔、岩溶管道及裂隙的实例。

2.3 TOUGH2

TOUGH(Transport of Unsaturated Groundwater and Heat)是美国劳伦斯-伯克利国家重点实验室开发的非饱和地下水流及热流运移模拟程序,可用于一维、二维和三维孔隙或裂隙介质水流及热量运移的模拟。TOUGH2 对井管及裂隙类高渗透性介质体的处理是基于双孔隙度法(DPM,Doubled-Porosity Method),将裂隙质和孔隙质处理为两个连续介质体。这两个介质体具有不同的导水系数,并由不同运动方程控制,两者之间通过窜流项(Inter-porosity Flow)耦合。对于裂隙形状相似,发育均匀的含水层而言,DPM 法能大量减少裂隙数据的输入,降低工作量,同时能满足较高的精度要求。国际上 Pruess^[24]利用 MINC(Multiple Interacting Continua,DPM 的概化)研究了裂隙型地热储集层中溶质迁移。Norifumi^[25]在研究断层中 CO₂ 运移时也采用了 MINC 法。

2.4 PGMS

PGMS 是在中国地质调查局地质大调查项目的支持下,集成陈崇希教授及其研究团队长期地下水模拟的研究,开发的可视化前后处理程序。PGMS 对井孔-含水层系统的模拟采用渗流-管流耦合模型,通过引入等效渗透系数概念达到了综合考虑多种水流状态、提高模型仿真性的多重目的。近几年 PGMS 软件已在多个地质调查项目中得到全面应用与检验^[18 26],个别水文地质模拟要素,如混合井孔更被多次应用。

3 发展趋势

基于等水头或等流量边界假设的模型,目前已经发展较为成熟,但其对井管形状及水流机理的不准确刻画决定该方法只在特定条件下才能满足要求。基于混合边界假设的模型,虽然较为接近物理实际,但受 CPU 计算能力及数值解法所限,目前仍难以得到广泛应用。高渗透体法能有效提高模型仿真性同时考虑井孔水流为紊流的情况,大大增加了其适用范围,但高渗透体法很少考虑含水层和水平井界面上的水头损失,对水流由径向转变为轴向流时的水头损失也缺少研究,另一个缺点是该方法对井孔内的水流刻画过于粗糙,不能处理一些要求精确刻画井孔内水流状态的应用。渗流-管流耦合模型考虑了多种水流状态大大增加了其使用范围,将井孔和含水层当成一个整体系统,能精细模拟小尺度和区域尺度井孔存在引起的井筒效应和对井周地下水流场的再分布。

井孔-含水层系统相关问题的解析解有一些假定,限制了其推广应用,数值解作为模拟井及井周水流

和水质问题的有力工具,但仍有一些问题待进一步研究,主要体现在以下几个方面:

(1) 井周地下水运动的精细刻画。在 CO_2 地质封存数值模拟中,围绕注入井出现逐步加密的网格^[27],分级加密网格的处理对注入效果进行很好的模拟,取得了较好的效果,但计算工作量增加了数倍。在地下水水流模拟中,为提高井周的模拟精度,要求对井周网格进行分级剖分,还需要详细分析小尺度下井孔存在对井周地下水流的动态影响,以期对井孔的影响分析提供理论支持。

(2) 考虑不同井孔内不同流态的数值模拟方法研究。对于井孔-含水层系统,分析井损条件下从层流到紊流五种流态下摩擦系数与雷诺数之间的关系,研究通过尼古拉兹曲线进行数据插值或寻找连续关系式。

(3) 目前的各类模型可分析井孔的存在对井周水流的再分布,可模拟多种流态下水流的运动,但对于水质的影响,还没有对应的模拟方法,需进一步分析水流再分布之后水质如何变化,以及在区域尺度下这种影响是否可以忽略。

4 结论

井孔-含水层系统的分析是一项复杂的研究,解析解从简化的模型中提供了地下水流和水质的动态,但数值模拟方法功能更强大,常用的数值模拟方法包括线源汇法、高渗透系数法和渗流-管流耦合模型法。线源汇法作为传统的数值模拟方法,适用于区域尺度研究;高渗透系数法仅考虑了不同两种流态(层流和紊流)对井筒中水头分布的影响,未考虑层流-紊流过渡态;同时对含水层和井界面上的水头损失也缺乏考虑,具有一定局限性;渗流-管流耦合模型相对考虑了井损和不同流态,即考虑了达西-非达西流,功能相对较强,而且应用于竖直和水平井数值模拟中。井孔作为区域地下水系统的一个窗口,其长期开采对地下水运动影响是巨大的,因此需从理论上分析井孔的存在对地下水流和水质的动态影响。目前对井周区域的网格离散不细、井孔中多种流态的连续性表达、局部井孔存在对区域地下水流影响规律及井孔-含水层系统中井孔对水质的模拟方法等问题尚待更进一步研究。

参考文献:

[1] 陈雨荪. 单井水力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1977. [CHEN Y X. Single well hydraulics

[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1977. (in Chinese)]

- [2] Cooley R L, Cunningham A B. Consideration of total energy loss in theory of flow to wells[J]. Journal of Hydrology, 1979, 43: 161 - 184.
- [3] Mohamed A, Rushton K. Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329: 98 - 109.
- [4] 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. [CHEN C X, JIANG J M, LIN M, et al. The seepage-pipe coupling model and its application: For the mix-pumping unstable ground water[R]. Wuhan: Institute of environmental geology; China University of Geoscience(Wuhan), 1992. (in Chinese)]
- [5] 陈崇希, 胡立堂. 渗流-管流耦合模型及其应用综述[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 70 - 75. [CHEN C X, HU L T. A review of the seepage-pipe coupling model and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 70 - 75. (in Chinese)]
- [6] Eungyu Park, H B Zhan. Horizontal well hydraulics in leaky aquifers[J]. Journal of Hydrology, 2003, 281: 129 - 146.
- [7] Eungyu Park, Zhan H B. Hydraulics of a finite-diameter horizontal well with wellbore storage and skin effect[J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(4): 389 - 400.
- [8] 万军伟, 沈仲智, 潘欢迎. 水平井的水力特征及其解析解的适用条件[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(5): 537 - 543. [WAN J W, SHENG Z Z, PAN H Y. Hydraulic Performance of Horizontal Well and Applicability of Its Analytical Solutions[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(5): 537 - 543. (in Chinese)]
- [9] Rosa A J, Carvalho R de S. A mathematical model for pressure evaluation in an infinite-conductivity horizontal[J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4(4): 559 - 566.
- [10] 詹红兵, 万军伟. 水资源和环境工程中水平井研究简介[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(5): 511 - 517. [ZHAN H B, WAN J W. Horizontal Wells in Water Resources and Environmental Engineering[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(5): 511 - 517.

- (in Chinese)]
- [11] Cassiani G , Kabala Z J. Hydraulics of a partially penetrating well: solution to a mixed-type boundary value problem via dual integral equations[J]. *Journal of Hydrology* , 1998 , 211: 100 – 111.
- [12] Chang Y C , Yeh H D. New solutions to the constant-head test performed at a partially penetrating well[J]. *Journal of Hydrology* , 2009 , 369: 90 – 97.
- [13] D K Babu , Odeh A S. Productivity of a horizontal well [J]. *SPE Reservoir Engineering* , 1989 , 4(4) : 417 – 421.
- [14] 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 – 4) : 258 – 268.
- [15] 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.
- [16] 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 J R , TANG Z H , ZHAI L J. The improved approach coupling two methods in MODFLOW to simulate a multiaquifer well [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology* , 2010 , 37(3) : 23 – 26. (in Chinese)]
- [17] 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.
- [18] 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 L T. 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)]
- [19] 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: 163 – 175.
- [20] Mohamed A , Rushton K. Horizontal wells in shallow aquifers: field experiment and numerical model [J]. *Journal of Hydrology* , 2006 , 329: 98 – 109.
- [21] Qian J Z , Zhan H B. Experimental evidence of scale-dependent hydraulic conductivity for fully developed turbulent flow in a single fracture [J]. *Journal of Hydrology* , 2007 , 339: 206 – 215.
- [22] Meyer B A , Kincaid T R , Hazlett T H. Modeling karstic controls on watershed-scale groundwater flow in the Floridan Aquifer of North Florida [C]// Lynn B Y , Calvin A , Barry F B. in *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. Reston: Geotechnical Special Publication No. 183 , American Society of Civil Engineers , 2008: 351 – 361.
- [23] Kincaid T R , Meyer B A. Delineating saturated conduit patterns and dimensions in the upper Floridan aquifer through numerical groundwater flow modeling [C]. San Francisco: American Geophysical Union , Fall Meeting , 2009.
- [24] Pruess K. Numerical simulation of multiphase tracer transport in fractured geothermal reservoirs [J]. *Geothermic* , 2002 , 31(4) : 475 – 499.
- [25] Norifumi T , Shigetaka N. Hydrogeochemical modeling for natural analogue study of CO₂ leakage due to Matsushiro earthquake swarm [J]. *Energy Procedia* , 2009 , 1(1) : 2413 – 2420.
- [26] 胡立堂,王忠静,Robin,等. 改进的 WEAP 模型在水资源管理中的应用[J]. *水利学报* , 2009 , 40(2) : 171 – 179. [HU L T , WANG Z J , Robin , *et al.* Application of improved WEAP model in water resources management [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* , 2009 , 40(2) : 171 – 179. (in Chinese)]
- [27] Zhou Q L , Birkholzer J T , Mehnert E , *et al.* Modeling basin- and plume-scale processes of CO₂ storage for full-scale deployment [J]. *Ground Water* , 2010 , 48(4) : 494 – 514.

Advances in numerical simulation methods of a “well-aquifer” system

XU Ya , HU Li-tang , YI Biao-qi

(College of Water Sciences , Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control
and Remediation of Ministry of Education , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China)

Abstract: The necessities and scientific background of research on a well-aquifer system is briefly introduced in this article , and the main problems in accurately simulating the small-scale well flow are also point out. The focus of this paper is mainly on the three basic methods of dealing with a “well-aquifer” system: line source (sink) method , High KV in wellbore and seepage-pipe flow model. The basic theory and disadvantages and advantages of these methods are summarized. In this paper , we also analyze several practical cases of three extensively used groundwater numerical simulation software (MODFLOW , TOUGH2 and FEFLOW) in simulating a well-aquifer system. The following aspects should be further studied: refined research of groundwater flow in and around a wellbore , the influences of “well-aquifer” flow system on groundwater quality , and the positions of a “well-aquifer” system on a large-scale groundwater system.

Key words “well-aquifer” system; numerical simulation; line sink; EHC; seepage-pipe flow model

责任编辑: 张若琳

(上接第 25 页)

[29] 毛战坡,尹澄清,王雨春,等. 污染物在农田溪流生态系统中的动态变化[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2614 - 2623. [MAO Z P, YIN C Q, WANG Y C, et

al. A study on nitrogen transport in a farmland stream in Liuchahe watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2614 - 2623. (in Chinese)]

A review on base-flow calculation and its application

QIAN Kai-zhu , LV Jing-jing , CHEN Ting , LIANG Si-hai , WAN Li

(School of Water Resources and Environment , China University of Geosciences (Beijing) , Beijing 100083 , China)

Abstract: Base-flow is the base river runoff supplied by groundwater. With features of sustaining a stable ecological system , exact calculation of base-flow is of important significance in eco-environmental problems of river cut off , land subsidence , shrinkage of lakes , degradation of vegetation , and so on. The focus of this paper is on the definition of base-flow , research importance , types of calculation methods , evaluation of application scope and prior developmental direction of these methods. The calculation types can be classified into graphic analysis method , numerical simulation method , hydrological modeling method , physical chemistry method and mathematical physics method. The paper places its emphasis on the base-flow application into calibration and validation of models , water resources management , ecological water demand , sediment transportation and ability of river self-purification. The research results can provide an important reference in base-flow calculation and its application in other fields.

Key words: base-flow; base-flow calculation methods; application of base-flow; ecological water demand

责任编辑: 张若琳