

基流计算方法的进展与应用

钱开铸, 吕京京, 陈 婷, 梁四海, 万 力

(中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 基流是由地下水补给河流的基本径流, 被视为具有维持生态系统稳定功能的河道基本径流, 其水量的准确计算在河流断流、湖泊萎缩和植被退化等一系列生态环境问题的研究具有重要意义。本文阐述了基流的定义与研究意义, 归纳评价了基流计算方法的类型、适用范围和优先发展方向。其中计算方法可分为图解法、数值模拟法、水文模型法、物理化学法及数学物理法等五类方法。在此基础上, 还着重总结了基流研究在模型校验、水资源利用、生态需水量、河流输沙量和河流自净力等方面的应用。该研究将在如何合理估算基流量及相关领域中具有重要的参考价值。

关键词: 基流; 基流计算方法; 基流的应用; 生态需水量

中图分类号: P642. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)04-0020-06

基流是地下水补给河道径流的基本水流, 是河道径流最主要的补给来源, 基流量的大小受到流域特征与季节性水文地质条件变化的影响。由于各研究区水文地质条件及基流产流过程的差异, 学者们针对基流量的计算提出了诸多方法。根据各方法原理的差异, 可归纳为图解法、数值模拟法、水文模型法、物理化学法及数学物理法等五类主要方法, 各类基流计算方法均存在一定的适用范围。

在基流研究过程中, 部分学者将河道基本流量简称为基流。此名称与地下水向河道排泄的基本流量略有不同。前者是维持河道一定流量的基本流量, 与基流关系密切。通常情况下, 将二者视为相同。基本流量被视为是维持流域生态功能的基本水量^[1], 在研究地表水水资源量、河道输沙量、生态需水量与河流自净能力时, 基本流量包含了基流量与人工调节的水量。此外, 基流量的计算还在地下水动态监测、水电站建设及河水盐度预测等方面都有广泛应用。

至今, 所提出的基流计算方法多数尚缺乏普适性, 且对各计算结果应用领域的归纳不明确。本文总结了各基流计算方法的原理, 划分了各方法的种类, 评述了

各方法的适用范围, 并首次归纳了基流计算结果应用的领域。该研究将利于合理计算基流量及基流在相关领域的应用。

1 基流定义及特征

自基流概念提出以来, 对其产流过程的认识仍存在差异, 基流至今没有统一的定义(图 1)。学者们^[2-5]认为基流有可能是来源于地下水、洪流退水、降水或是其他延迟水源(壤中流、潜水径流或融水)。基流与河道径流在流量、波峰和周期存在差异, 前者主要表现为削减性、平滑性、稳定性和滞后性(延迟性)。对基流定义、产流过程和特征的正确认识有利于合理地计算基流量和科学地应用基流研究的结果。

2 基流计算方法分类

由于各研究区水文地质条件及基流产流过程的差异, 针对基流量的计算提出了诸多方法。根据基流计算方法的原理, 可分为图解法、数值模拟法、水文模型法、物理化学法及数学物理法等五类方法(图 2)。图解法主要根据工作经验对河川径流过程线进行几何剖分, 主要包括直线平割法与直线斜割法等。考虑到图解法的简略性和主观性, 部分学者结合计算机技术与信号处理技术, 提出了数值模拟法, 主要包括滤波法与加里宁法等。该法参数物理意义不明确, 因而并没有得到完全肯定。水文模型法是利用水文循环的概念模型, 分别计算各水均衡项的基流分割方法。其中以水量均衡法与新安江法等为主。随着同位素监测技术的发展, 可信度高的物理化学法利用同位素示踪性计算基流量所占径流的比例。由于理化法对监测仪器和监

收稿日期: 2010-08-12; 修订日期: 2010-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072191); 青藏高原资源开发的环境承载力评价方法与综合研究(1212010818093); 中国地质大学(北京) 研究生科技创新基金

作者简介: 钱开铸(1987-), 男, 博士研究生, 地下水科学与工程专业, 主要从事生态水文地质学和随机水文地质分析等相关的研究。

E-mail: qiankaizhu@126.com

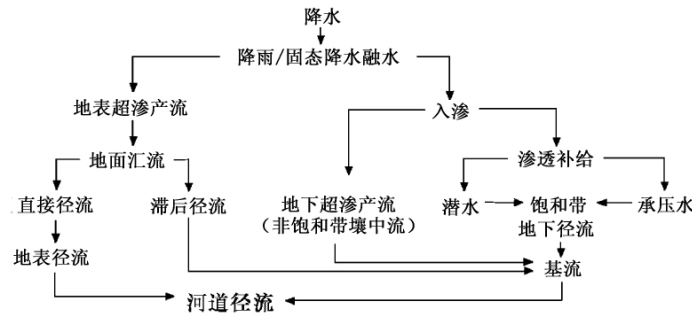


图 1 基流产流模型

Fig. 1 Model of base-flow generation

测区水文地质条件要求比较高,尚未得到大规模应用。上述各类方法均对基流产流的物理机制探索较少,数学物理方法较好地解决了这一问题,通过建立数学物理方程,较好刻画了基流产流的物理机制,进而求解基流量。该法得到了广泛研究。其中代表方法是水动力学法。

线法和综合退水法。直线平割法是以一条水平线将流量进程线的波峰水平切割,并规定水平切割线以上为地表径流贡献量,以下为基流贡献量。其中水平线代表的径流值可确定为年内枯季最小流量、枯季最小日平均流量^[6]和年内最小月平均流量。直线平割法的理论与应用方法较简略,不适于精细数据的处理。直线斜割法是指将枯季无明显地表径流的河流径流量全部作为基流量的方法,退水拐点的选取是应用的关键。该法仅适用于单洪峰型或双洪峰型的流量过程线。退水曲线法是指在流量过程线上判别起涨点和退水拐点,分别取两点的切线方向并沿其方向延伸后相交,其交点应低于流量进程线。该方法指明起涨点和退水拐点以及其切线方向的作用,反映了地下水 and 地表水转换的过程。综合退水曲线法是指取多次退水曲线的外包络线,内切年内流量过程中波峰段,从而确定各拐点以绘制基流过程,将区分径流中退水特性不同的地表径流、壤中流和地下径流。

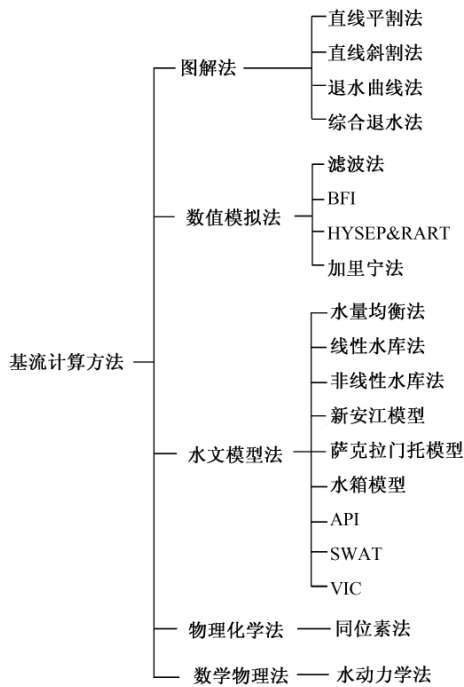


图 2 基流计算方法分类图

Fig. 2 Classification of base-flow calculation methods

2.1 图解法

图解法是根据径流过程线的几何特征,依照水文地质工作经验判断分割位置及方式的方法。该法仅对完整的波峰进行分割,无法解释不同波峰间本质的内在联系,基流量计算结果较粗略。

图解法主要包括直线平割法、直线斜割法、退水曲

2.2 数值模拟法

数值模拟法基于信号处理技术,通过河道径流量计算基流量。计算机运算能力决定了该方法的精度。其中主要方法包括滤波法、BFI法、HYSEP法、PART法和加里宁系列方法。该类方法所用参数的物理意义不明确,但其计算的基流值满足基流所应具备的特征,并且可直接编写程序进行运算,具有客观、可重复性、易操作等特点,已经在实践中大量应用并得到了认可。

2.2.1 滤波法

近年来,源于信号处理技术的滤波法在基流计算研究中得到广泛应用与改进,形成较完整的方法体系。滤波法^[7]将水文年中日径流量视为由高频信号(地表水)和低频信号(基流)叠加而成,利用信号处理技术,将高频信号和低频信号分离,即将基流从径流的序列中分解出来。“电子滤波法”是依据“简单平滑分割

法”和“回归电子滤波法”推导出的,它可利用长历时径流资料计算基流,从而分析流域地下水对河流的贡献随时间的变化,具有较好的客观性和可重复性^[8-9]。

2.2.2 BFI法

BFI法是以基流指数(Base Flow Index-基流量与总径流量的比值)为权系数计算基流量的方法。在区域枯季径流的研究中,该值可反映区域地下水资源量的参数。通常情况下,主要由地下水补给的河流基流指数接近1,而季节性河流的基流指数趋近0。基于“简单平滑分割法”设计了BFI程序,具有易操作及可重复性的特点,并得到了广泛的应用,但其对输入的数据有格式要求。

2.2.3 HYSEP法和PART法

HYSEP法和PART法是美国地质调查局使用的主要基流计算方法。其中HYSEP程序首次实现基流计算的程序化,并提供了局部最小值法、固定步长法和滑动步长法三种计算方式^[10],其中因局部极小值法可计算出最小的日平均基流而得到广泛应用。该程序具有易操作、可重复性、可计算长期的径流资料、计算速度快和方法多样等优点,但该程序对数据格式有要求。PART程序^[11]适用于以谷地泻流方式排泄或测站位于下游终点的河流,所需径流资料不少于一个水文年。

2.2.4 加里宁法

20世纪50年代,Kalinen提出基流是由与河道径流无水力联系的基岩裂隙水补给的,并假定含水层的补给量与地表径流量之间存在 $1/(B+1)$ 的比例关系(地下径流与总径流之比)。1985年,杨远东对加里宁法进行了改进,认为基流量是由前期所有的地下径流量加权计算得到的。考虑到基流与前期径流量的关系,陈利群^[7]进一步修改了改进加里宁公式。加权平均和动态衰减理论使得改进的加里宁方法在基流计算方法中相对成熟。该方法恰当地引进了 B 值和 α 值^[12],使其对径流过程线的拟合度较好,且基流过程滞后于径流过程。

2.3 水文模型法

基于区域水文循环的概念模型,水文模型法计算流域各水均衡项的水量,从而计算区域基流量。其主要方法包括水量均衡法、线性水库法、非线性水库法、新安江模型、萨克拉门托模型、水箱模型、API模型、SWAT模型和VIC模型。基于质量守恒原理,该方法物理意义明确,具有客观、可重复性的特点,在实践中得到了大量的验证。但其对使用者的操作能力要求较高,且模型所需调试的参数较多。

2.3.1 水量均衡法

水量均衡法是指根据流域水均衡方程,将系统的输入量分解为输出量和消耗量的基流算法。其典型方法为云南均衡法^[13]。在水资源评价中,水量均衡法应用较广泛,一般利用其计算的基流量来校验其他基流计算的结果。

2.3.2 水库法

水库法采用单一线性水库或者两个串连的线性水库模拟计算基流。线性水库法假定地下径流与地表径流呈线性关系,不一定符合研究区流域的水文规律。非线性水库法是根据非线性经验公式的基流计算方法,反映了实际的退水过程^[14]。非线性水库法所需率定的参数较多,存在一定的主观性。

2.3.3 降雨径流模型法

水文模拟方法是采用降雨径流模型来模拟基流^[2],其主要类型包括:新安江模型;萨克拉门托(Sacramento)模型;水箱(Tank)模型;API型模型。这些方法的区别在于模拟的产流方式不同,其中水箱模型内部不可见。其它方法还包括SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型;VIC(Variable Infiltration Curve)模型。该类方法的参数易调试,对原始资料要求不高,在资料范围内能取得好结果。

2.4 物理化学法

物理化学法可利用放射性示踪剂计算地下水补给在河道径流量中的比例,该方法主要在圈闭性和单一性的山区流域运用,通过同位素示踪剂阐述基流产流过程,并解释河道径流中降水、地表径流和地下径流的比例,计算出基流在河道流量中的贡献量。物理化学法相对于其他方法最大的优点是可操作性高和可信度高,也可验证其它方法的基流计算结果,是未来基流计算方法的发展方向之一^[15]。

2.5 数学物理法

数学物理法是通过分析基于地表水与地下水的转换特征的退水曲线,建立具有明确物理性质的数学模型并计算出基流量的基流计算方法。其各参数具有明确的物理含义,其典型方法为水动力学分析法^[16]。数学物理法可信度高,但当结果出现较大偏差时,多参数调整与适用范围确定的难度较大。

3 基流研究的应用

除可反映区域地下水对河道补给的情况外,基流还广泛应用在模型校验、水资源利用、生态需水量计算、河流输沙量计算和河流自净能力计算等方面(图

3)。在生态需水量的计算中,基本流量是流域生态需水量的重要组分^[17]。作为维持流域社会经济发展的河道基本水量^[18],基本流量是水资源利用与评价中的重要基础之一。在河流输沙能力的计算中,基本流量对预防河道淤积以及区域水土流失等方面起到重要作用。在河流自净方面,基本流量被认为是维持河流对污染物的自我净化能力的水量^[19]。另外,基流量还可以作为水文模型校验的参数,通过模型模拟的基流量与计算基流量的对比,可有效提高模型模拟的准确性^[20]。此外,基流量的计算与分析还在地下水动态监测、水电站建设及河水盐度预测等领域有贡献。

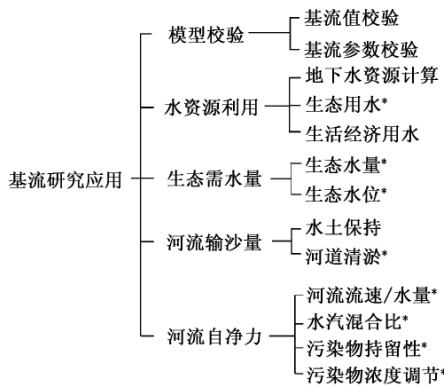


图 3 基流研究应用分类图

(* 属于基本流量相关应用)

Fig. 3 Classification of base-flow research application(* belong to basic flow)

3.1 模型校验

模型校验是指利用基流计算的结果,以合理调整模型参数为目的,对模拟的基流值进行校验的过程。基流量作为区域地下水资源的重要表现形式,是区域水循环的主要水均衡项之一。随着基流研究在水文地质应用领域的扩展,可利用其它基流计算方法计算的基流量或影响基流的参数作为标准值进行模型校验^[21]。

3.2 水资源利用

水资源利用是指在满足生态环境稳定和社会经济发展的基础上,合理利用流域水资源的过程。基本流量是流域地下水资源的主要表现形式之一,在满足供水的基础上,它是维持河流的生态平衡的用水量^[1]。根据生态稳定及城市发展等原则,合理地配置区域水资源,可协调和稳定生态^[22]、社会和经济的发展^[20]。水资源管理时,应科学地保留河道基本流量,以避免河流断流及其它生态环境问题。基流量作为地下水水循环中主要的均衡项,其计算对于确定地下水对河道径

流的贡献、计算地表水与地下水的重复量、认识流域水循环的规律和识别地下水变异驱动因子等提供了科学依据^[23]。

3.3 生态需水量计算

基本流量是能维持河流正常生态功能的径流量^[24]。河道基本流量与流域生态环境存在密切联系,确定基本流量可为计算流域生态需水量提供数据。学者在研究基本流量与生态系统关系时,根据不同的指标或研究要求,常提出“生态基流”、“最小生态流量”、“环境流量”或“生态需水量”等概念。生态基流能维持研究区生态系统的稳定,水生生物的正常生长,以及满足水域排盐、入渗补给、污染自净等方面的要求。此外在环境基本流量得到保证的前提下,还需满足水面生态系统需水要求^[25]。

计算与研究河流生态基本流量的目的在于预防由流量减少和河道断流造成的生态环境恶化,以实现流域河流生态系统的可持续发展。在水域生态系统中,调查分析水体生物生产量与水量之间的关系,估算合理的定量关系与回归系数;再根据维持水域生态系统平衡的最小生产量计算出所需的生态环境需水量^[19];也可根据河流径流的生态积分和生态效益^[26],计算水库生态基流补偿效益。同时,还需考虑流域内不同水系、不同河段生态环境的差异性和时空变化规律,通过改进生态环境需水量的计算方法,分析河流的空间结构特征、各河段的相互关系以及流域的水文特征,建立整合计算模型。

3.4 河流输沙量计算

河道基流量计算可确定河流输沙量,它是计算当地水土流失量和河流清淤量的基础。近年来,我国大部分流域生态环境日渐脆弱,水土资源开发利用不合理,河流输沙量的准确计算已成为解决由水土流失所造成的生态环境问题的前提^[19]。为保持流域河道系统的稳定,须维持河道基本流量以输送泥沙。随着河流上游基流的减少与中下游地区耗水量的增加,下游高含沙洪水出现机率增大,并导致防洪工程对河势的控导作用削弱^[27]。如何协调河流上下游水库蓄水、河道基流以及河沙淤积的关系,成为基流研究在水土保持方面应用的重要内容^[28]。研究基流在河流输沙量计算方面的应用对于流域水土资源可持续利用具有重要意义。

3.5 河流自净能力计算

河流自净作用是指河流对污染物质的稀释净化能力,在其环境容量允许的范围内,河流能通过物理、化

学和生物作用,使纳污量在流动过程中自然降低的过程^[19]。河道基本流量可控制河流流速、河流激荡的程度以及河水与空气的混合比例,从而氧化分解污染物。河流的基本流量决定了其自净作用的强度。基流还可影响非点源污染物的持留性与释放的空间动态,河流的物理、化学及生物自净过程。同时,对河流污染物的监测与检测,能有效指导河道基本流量的调节。河道基本流量作为污染物的输送介质,维持其原有流量可降低河流污染物的浓度,对周边生态环境有重要意义^[29]。

4 结语

本文阐述了基流的定义、特征、产流过程以及基流研究的目的与意义。基流是由地下水补给河流的河道基本径流,其大小受到流域特征与季节性水文地质条件变化的影响。基流量主要来源于饱和带潜水对河流的补给,部分水量还可能来源于承压水与非饱和带土壤水(地下超渗产流)等的补给。根据各基流计算方法的原理,将其归纳为图解法、数值模拟法、水文模型法、物理化学法和数学物理法等五种主要类型。

本文区分了基流量与基本流量的定义。通常情况下,两者相同;在研究地表水水资源量、河道输沙量、生态需水量与河流自净能力时,基本流量包含基流量与人工调节的水量。河道基流量的应用领域分为模型校验、水资源利用、生态需水量计算、河流输沙量计算和河流自净能力计算等方面。在水文模型校验方面,可利用基流计算值及基流参数对水文模型模拟的结果进行校验。在水资源利用方面,基流量可有效评价地下水对河流的年内贡献及合理计算区域水资源可利用量。生态需水量计算中,基本流量为计算流域生态需水量提供数据。在河流输沙量的计算方面,通过基本流量可计算水土流失量和河流清淤量。在河流自净能力计算方面,基本流量的大小决定了河流对污染物的净化作用强弱。

参考文献:

- [1] 武会先,吕洪予.确定河流生态需水量的方法[J].人民黄河,2006,28(6):12-13. [WU H X, LV H Y. Calculation Method of River Ecological Water Requirement[J]. Yellow River, 2006, 28(6): 12-13. (in Chinese)]
- [2] Hall F R. Base flow recessions: a review[J]. Water Resource Research, 1968, 4(5): 973-983.
- [3] Appleby V. Recession flow and the base-flow problem [J]. Water Resources Research, 1970, 6(5): 1398-1403.
- [4] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review [J]. Journal of Hydrology, 2001(240): 147-186.
- [5] 赵玉友,耿鸿江,潘辉学.基流分割问题评述[J].工程勘察,1996(2):30-36. [ZHAO Y Y, GENG H J, PAN H X. Evaluation of base flow separation problems [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1996, 2: 30-36. (in Chinese)]
- [6] 刘昌明,成立.黄河干流下游断流的径流序列分析[J].地理学报,2000,55(3):257-265. [LIU C M, CHENG L. Analysis on runoff series with special reference to drying up courses of lower Huanghe River [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 257-265. (in Chinese)]
- [7] 陈利群,刘昌明,李发东.基流研究综述[J].地理科学进展,2006,25(1):1-15. [CHEN L Q, LIU C M, LI F D. Reviews on base flow researches [J]. Progress in Geography, 2006, 25(1): 1-15. (in Chinese)]
- [8] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating base-flow and ground water recharge from stream flow [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2): 411-424.
- [9] 陈利群,刘昌明,杨聪.黄河源区基流估算[J].地理研究,2006,25(4):659-665. [CHEN L Q, LIU C M, YANG C. Baseflow estimation of the source regions of the Yellow River [J]. Geographical Research, 2006, 25(4): 659-665. (in Chinese)]
- [10] Pettyjohn W A, Henning R. Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related stream-flow and water quality in Ohio [R]. Ohio State University Water Resources Center Project Completion Report, 1979, 552: 323-325.
- [11] Rutledge A T, Daniel C C. Testing an automated method to estimate ground-water recharge from stream-flow records [J]. Groundwater, 1994, 32(2): 180-189.
- [12] 郑继尧,杨远东.加里宁地下水估算改进方法应用分析与探讨[J].水利规划与设计,2003(3):30-38. [ZHENG J Y, YANG Y D. Application analysis and discussion of advanced Kalinline-Abarleyang method [J]. Water Resources Planning and Design, 2003(3): 30-38. (in Chinese)]
- [13] 伍立群,代兴兰.河川基流分割法在山丘区地下水资源量评价中的运用[J].中国农村水利水电,2005(1):35-38. [WU L Q, DAI X L. Application of

- river base flow separation in the evaluation of groundwater resources in mountainous areas [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2005(1): 35 - 38. (in Chinese)]
- [14] Wittenberg H, Sivapalan M. Watershed groundwater balance estimation using stream-flow recession analysis and base-flow separation [J]. *Journal of Hydrology*, 1999(219): 320 - 331.
- [15] Pinder G, Jones J F. Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff [J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(2): 438 - 445.
- [16] Birtles A B. Identification and separation of major base-flow components from a stream hydro-graph [J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(5): 791 - 803.
- [17] 刘静玲, 杨志峰, 肖芳, 等. 河流生态基流量整合计算模型 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25(4): 436 - 441. [LIU J L, YANG Z F, XIAO F, *et al.* Conformity calculation models on river ecological base flows [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 436 - 441. (in Chinese)]
- [18] 文松霖, 张家发. 城市雨水流出抑制技术及其应用展望 [J]. *人民长江*, 2005, 36(10): 26 - 28. [WEN S L, ZHANG J F. Rainfall flowing out limiting technology in urban area and prospect of its application [J]. *Yangtze River*, 2005, 36(10): 26 - 28. (in Chinese)]
- [19] 董增川, 刘凌. 西部地区水资源配置研究 [J]. *水利水电技术*, 2001, 32(3): 1 - 4. [DONG Z C, LIU L. Study on the Water Resources Allocation of West China [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2001, 32(3): 1 - 4. (in Chinese)]
- [20] 杨桂莲, 郝芳华, 刘昌明, 等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价: 以洛河流域为例 [J]. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 463 - 471. [YANG G L, HAO F H, LIU C M, *et al.* The study on base flow estimation and assessment in SWAT: Luohe Basin as an example [J]. 2003, 22(5): 463 - 471. (in Chinese)]
- [21] Batelaan O, Smedt F D. GIS-based recharge estimation by coupling surface - subsurface water balances [J]. *Journal of Hydrology* 2007(3 - 4): 337 - 355.
- [22] 杜晓舜, 夏自强. 洛阳市水资源可利用量研究 [J]. *水文*, 2003, 23(1): 14 - 20. [DU X S, XIA Z Q. Study on the Available Water Resources in Luoyang City [J]. *Hydrology*, 2003, 23(1): 14 - 20. (in Chinese)]
- [23] 林学钰, 廖资生, 苏小四, 等. 黄河流域地下水资源及其开发利用对策 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2006, 36(5): 677 - 684. [LIN X Y, LIAO Z S, SU X S, *et al.* Groundwater Resources and Their Countermeasures of Development and Utilization in Yellow River Basin [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2006, 36(5): 677 - 684. (in Chinese)]
- [24] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算 [J]. *地理学报*, 2000, 55(4): 495 - 499. [LI L J, ZHENG H X. Ecological and environmental water consumption of river systems in Haihe-Luanhe basins [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 495 - 499. (in Chinese)]
- [25] 阳书敏, 邵东国, 沈新平. 南方季节性缺水河流生态环境需水量计算方法 [J]. *水利学报*, 2005, 36(11): 1341 - 1346. [YANG S M, SHAO D G, SHEN X P. Quantitative approach for calculating ecological water requirement of seasonal water-deficient rivers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(11): 1341 - 1346. (in Chinese)]
- [26] 郑志宏, 张泽中, 薛小杰, 等. 龙刘梯级水库群对黄河生态基流补偿效益 [J]. *水力发电学报*, 2009, 28(4): 13 - 17. [ZHENG Z H, ZHANG Z Z, XUE X J, *et al.* Basic ecological flow compensation benefit of Longyangxia and Liujiuxia cascade reservoirs for Yellow River [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering* 2009, 28(4): 13 - 17. (in Chinese)]
- [27] 江恩惠, 梁跃平, 张原锋, 等. 新形势下黄河下游游荡性河道整治工程设计有关问题探讨 [J]. *泥沙研究*, 1999(4): 26 - 31. [JIANG E H, LIANG Y P, ZHANG Y F, *et al.* Study for Designs of River Training Works in Wandering Reach of the Lower Yellow River Under New Circumstances [J]. *Journal of sediment research*, 1999(4): 26 - 31. (in Chinese)]
- [28] 许炯心. 流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响 [J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2004, 34(8): 775 - 781. [XU J X. Sediment Transferring Function of the Lower Yellow River Influenced by Drainage Basin Factors and Human Activities [J]. *Science in China: Sec D Earth Sciences*, 2004, 34(8): 775 - 781. (in Chinese)]

(下转第31页)

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