

流量过程多水源分割方法探讨^{*}

包为民^{1,2}, 张小琴^{1,2}, 付森彪³, 徐诗军⁴, 瞿思敏^{1,2}, 江 鹏^{1,2}

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 3. 绍兴市曹娥江大坝建设管理委员会, 浙江 绍兴 312000; 4. 绍兴市人民政府 防汛防旱指挥部办公室, 浙江 绍兴 312000)

摘 要:分析了目前流量过程线分割存在的问题,具体指出了同位素分析方法会使地下径流分割系统偏大的原因,提出了以稳定同位素和惰性离子质量平衡方程为基础的多水源流量过程线分割方法。

关键词:多水源分割;同位素质量平衡;惰性离子质量平衡

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)04-0049-03

Study of Multiple Components by Hydrograph Separation Method

BAO Wei-min^{1,2}, ZHANG Xiao-qin^{1,2}, FU Sen-biao³, XU Shi-jun⁴, QU Si-min^{1,2}, JIANG Peng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Shaoxing Municipal Cao'e River Floodgate Construction Administration Committee, Shaoxing 312000, China;

4. Office of Shaoxing Municipal Flood Control and Drought Relief Headquarters, Shaoxing 312000, China)

Abstract: By analyzing the issues existed in present hydrograph separation and pointing out the causes which the separated groundwater components are systematically larger than the observed, hydrograph separation method of multiple components based on the mass balance of steady isotope and inert elements was put forward.

Key words: multiple component separation; isotopic mass balance; inert element mass balance

1 水源分割问题分析

流域概念性模型研究在 20 世纪 70 年代末以来的 20 余年间几乎没有大的发展,其关键是建模所需的信息没有突破,目前建模所需的信息还十分缺乏。虽然流域出口断面的流量过程包含了建模所需的所有信息,但这信息过于综合,对于建模来说难以充分利用。流域水流的水源分割就是为解决信息利用问题而提出来的,长期来为国内外水文科学工作者所重视。但由于技术条件、实验手段和研究方法的限制,长期来研究者众多而成果少,罕有突破性、为广大水文科学家所认同的成果,基本上停留在模型模拟分割、假设简化分割、试验流域分层检测分割这样一些既不客观又不能为大家认可的水平上。

目前的流量过程分割方法,归纳起来主要有流

量过程斜线分割法、模型假设计划分法、传统水文实验和同位素实验划分方法。这些方法都只能分割 2 或 3 种水源,其获得的信息不能满足流域水文建模要求;而水文学的斜线分割法或模型假设计划分法划分结果不客观,不同操作人员,可获得不同的划分结果;对于传统水文实验常会破坏自然状况而获得失真的实验结果;稳定同位素划分法甚至会使划分结果不合理。同位素在流域水源过程示踪研究中的应用,由于能有效的避免对自然状况模拟的失真问题,已引起各国水文学家空前的重视。特别同位素质量平衡在划分流量过程中的应用,由于结果与传统的水文物理概念差别很大,引起广大水文研究专家的兴趣,所以这里重点分析该方法的问题。

当前同位素分析中采用的都是两水源分割方

^{*} 收稿日期:2009-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50679024);“十一五”国家科技支撑计划课题基金资助项目(2006BAC05B02);高等学校学科创新引智计划项目资助(B08048);教育部长江学者和创新团队发展计划资助(IR T0717)。

作者简介:包为民(1956-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为水文水资源。E-mail:wmbao@hhu.edu.cn

法。假设地面以下径流的同位素丰度的研究。

$$Q = QS + QG \quad (1)$$

$$C \cdot Q = CS \cdot QS + CG \cdot QG \quad (2)$$

据式(1)和(2)可得分割计算公式

$$QS = \frac{C - CG}{CS - CG} Q \quad (3)$$

$$QG = \frac{C - CS}{CG - CS} Q \quad (4)$$

式中: QS ——地面流量; QG ——地面以下流量; Q ——总的流量; CS ——地面流量所含的同位素含量; CG ——地面以下流量含的同位素含量; C ——总流量所含的同位素含量。

用式(3)、(4)分割流量过程,明显的会使地面径流偏小和地下径流偏大。分析其原因是由于分割假设条件与实际不符所致。因为土壤水分中所含同位素丰度不仅随时间变化,而且还随垂向土层的不同埋深而变化。一般土壤中水分的同位素含量会随蒸发分馏而浓缩,越接近表层其同位素含量的变化会越大,只有到接近地下水潜水层的表面,其同位素含量才会相对稳定。因此说,实际土壤水分中同位素的含量一般是大于基流的含量,两水源分割中作为相同处理,就会导致分割的地面径流偏小而地下径流偏大。

两水源分割的不合理性还可由以下三水源推导证明。三水源的水量和同位素质量平衡关系为

$$Q = QS + QI + QG \quad (5)$$

$$C \cdot Q = CS \cdot QS + CI \cdot QI + CG \cdot QG \quad (6)$$

据式(5)和(6)可得分割计算公式

$$QS = \frac{C - CG}{CS - CG} Q + \frac{CI - CG}{CG - CS} QI \quad (7)$$

$$QG = \frac{C - CS}{CG - CS} Q - \frac{CI - CS}{CG - CS} QI \quad (8)$$

式中: QI ——壤中流流量; CI ——壤中流所含的同位素含量。式(7)、(8)中的第一项分别相同于式(3)、(4)中等号右边项,而第二项据土壤水分由于蒸发分馏而使同位素浓缩的机理可判断都是正的。所以说一般情况下,式(3)获得的地面径流必然是偏小的,而式(4)获得的地下径流必然是偏大的。

根据日本 Rachidani 试验流域对 δ 含量的观测^[5],多次洪水降雨平均为 - 58.9%,相应的壤中流、地下径流和断面流量平均分别为 - 51.6%、- 57.6%和 - 58.1%。据两水源划分结果,该流域地面径流占 38%,地下径流占 62%。而把这代入式(7)、(8)得 3 种径流的划分比例,见表 1。从表 1 中可看出,壤中流对地面和地下径流划分的影响是非常灵敏的。而且其影响大小取决于壤中流 δ 含量与地下径流的差

异,所以说两水源划分方法是不合理的。

表 1 QI 对地面和地下径流划分比例影响

$QI/\%$	0	3	5	8	10
$QS/\%$	38	52	61	75	84
$QG/\%$	62	45	34	17	6

2 多水源分割方法

假设流域需划分为 n 种水源 Q_1, Q_2, \dots, Q_n , 有水量平衡关系

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (9)$$

在土壤水分取样分析中也可分析 $n-1$ 种同位素的含量,则分别有 $n-1$ 种同位素的质量平衡关系

$$C_{1,0} Q = C_{1,1} Q_1 + C_{1,2} Q_2 + \dots + C_{1,n} Q_n$$

$$C_{2,0} Q = C_{2,1} Q_1 + C_{2,2} Q_2 + \dots + C_{2,n} Q_n$$

...

$$C_{n-1,0} Q = C_{n-1,1} Q_1 + C_{n-1,2} Q_2 + \dots + C_{n-1,n} Q_n$$

(10)

式中同位素含量的第 1 个下标表示不同同位素,第 2 个下标表示不同的水源相应的同位素含量。由式(9)和(10)组成的方程组,可得分割流量解。

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ C_{1,1} & C_{1,2} & \dots & C_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n-1,1} & C_{n-1,2} & \dots & C_{n-1,n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ C_{1,0} \\ \vdots \\ C_{n-1,0} \end{bmatrix} Q \quad (11)$$

3 结语

分析了目前流量过程分割方法,发现主要存在 4 大问题。一是只能分割 2 或 3 种水源,其获得的信息不能满足流域水文建模要求;二是划分结果不客观。如水文学的斜线分割法或模型计算划分法等,不同操作人员,可获得不同的划分结果;三是实验结果失真。如传统的分水源观测实验,常会破坏自然状况而获得失真的实验结果;四是划分结果不合理。如稳定同位素划分法,会把地面径流划入地下径流中,使得洪峰的地下径流比例会高达 95% 或甚至更高的不合理结果。论文提出了多水源流量过程线分割方法,以稳定稀有同位素和惰性离子的质量平衡方程为基础,可以划分多种水源成分,且由于划分方法完全以物理定律为基础,方法的合理性和效果是传统方法不可比的。

流域水流的水源成分是十分复杂的,特别是土壤中水流向出口断面的运动,其信息全部反映在流域出口断面的流量过程线中,很难区别并确定其水源成分。本文提出“流量过程多水源分割实验研

究”,水源的数量不需人为确定,可以按照流域水源成分在出口断面形成的流量过程特征差异,自动分析确定应该有的水源数、水源量及各种水源在出口断面形成的流量过程。而且整个分割过程满足水量平衡和同位素质量平衡方程,结果符合实际情况,有望获得水源分割方面突破性的成果。

参考文献:

- [1] McGlynn B L, McDonnell J J, Brammer D D. A review of the evolving perceptual model of hillslope flowpaths at the Maimai catchment, New Zealand[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 257:1-26.
- [2] Weiler M, McDonnell J. Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 285:3-18.
- [3] Hendry M J, Kelln C J, Wassenaar L I, et al. Characterizing the hydrogeology of complex clay-rich aquitard system using detailed vertical profiles of the stable isotopes of water[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 293:47-56.
- [4] Landon M K, Delin G N, Komor S C, et al. Comparison of the stable-isotopic composition of soil water collected from suction lysimeters, wick samplers, and cores in a sandy unsaturated zone[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 244:45-54.
- [5] Asano Y, Uchida T, Ohte N. Residence times and flow paths of water in steep unchannelled catchments, Tanakami, Japan[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 261:173-192.
- [6] Perrin J, Jeannin P Y, Zwahlen F. Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 279:106-124.
- [7] Scrimgeour C M. Measurement of plant and soil water isotope composition by direct equilibration methods[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 172:261-274.
- [8] Shurbaji A R M, Philips F M. A numerical model for the movement of H_2O , $H_2^{18}O$, and 2H_2O in the unsaturated zone[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 171:125-142.
- [9] Kendall C, McDonnell J J. Isotope tracer in catchment hydrology[M]. New York: Elsevier, 1998:839.
- [10] Laudon H, Slaymaker O. Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 201:82-101.
- [11] Shurbaji A R M, Philips F M, Campbell A R, et al. Application of a numerical model for simulating water flow, isotope transport, and heat transfer in the unsaturated zone[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 171:143-163.
- [12] Lambs L. Interactions between groundwater and surface water at river banks and the confluence of rivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 288:312-326.
- [13] Araguas L A, Rozanski K, Gonfiantini R, et al. Isotope effects accompanying vacuum extraction of soil water for stable isotope analyses[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 168:159-171.
- [14] Tseng P H, Soll W E, Gable C W, et al. Modeling unsaturated flow and transport processes at the Busted Field Test Site, Nevada[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62:303-318.
- [15] 汪集旸. 同位素水文学与水资源、水环境[J]. *中国地质大学学报:地球科学*, 2002, 27(5):532-533.
- [16] 庞忠和. 同位素水文学领域的国际科研合作与发展援助[J]. *水文地质工程地质*, 2004(3):114-116.
- [17] 宋献方, 夏军, 于静洁, 等. 应用环境同位素技术研究华北典型流域水循环机理的展望[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(6):527-537.
- [18] 顾慰祖. 利用环境同位素及水文实验研究集水区产流方式[J]. *水利学报*, 1995(5):9-17.
- [19] 顾慰祖, 谢民. 同位素示踪划分藤桥流域流量过程线的试验研究[J]. *水文*, 1997(1):29-32.
- [20] Wang Jiyang, Sun Zhanxue. Brief review on the development of isotope hydrology in China[J]. *Journal of Science in China*, 2001, 44(S):1-5.
- [21] Liu Heng, Chen Mingzhong. Water resources assessment issues and isotope hydrology application in China[J]. *Journal of Science in China*, 2001, 44:6-10.
- [22] Zhang Xinping, Yao Tandong, Masayoshi Nakawo. Oxygen-18 in present-day precipitation on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Science in China*, 2001, 44:41-47.