

# 同位素示踪剂在流域水文模拟中的应用

瞿思敏<sup>1,2,3</sup>, 包为民<sup>1,2</sup>, Jeffrey J. McDonnell<sup>3</sup>, 余钟波<sup>1</sup>, 石 朋<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098;  
3. Department of Forest Engineering, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA 97330)

**摘要:** 主要目的是通过对同位素在流域水文模拟应用中的一些假定、限制条件以及方法进行澄清和系统化, 从而促进同位素在流域水文模拟中一些新的研究方向和研究热点。主要从三个方面, 即同位素流量过程线分割、流域平均滞时与不同水源混合、与水文模型耦合, 讨论同位素示踪剂在流域水文模拟中的研究进展情况。同时指出了同位素在流域水文模拟中应用存在的一些主要问题, 包括: 降雨同位素含量的时空变化; 不同径流成分的采样; 径流输出同位素含量的空间变化; 流域平均滞时分布函数的确定; 水文同位素耦合模型。

**关键词:** 同位素; 流量过程线分割; 三水源; 流域平均滞时; 概念性水文模型

**中图分类号:** P338.9; G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2008)04-0587-10

流域水文规律研究, 在 20 世纪 70 年代末以来的近 30 年间几乎没有大的发展。突破流域概念性模型研究的关键是要突破建模所需的信息。目前建模所需的信息还十分缺乏, 所以只能停留在概念性模型的水平。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。

关于建模信息利用问题, 目前有两种主要的解决方法。一种是数据挖掘技术。另一种是采用其他的辅助数据, 比如同位素示踪剂、化学示踪剂、地下水位观测、包气带中土壤含水量分布等等, 来检验模型结构, 进而对其进行修正, 使模型结构更合理, 能更好地解释流域上的水文现象, 同时也可以借助这些数据限定模型参数范围, 提高参数可识别性, 减少参数的不确定性。本文主要讨论第二种方法, 并侧重于同位素示踪剂在流域水文模拟中的应用。

由于稳定同位素 D 或<sup>18</sup>O 在水文过程中主要受混合影响以及因物理条件如蒸发、凝结等变化而构成同位素分馏影响, 且以不同水源的混合影响为主, 因而可用来示踪不同水源的径流成分。

随着同位素分析技术的提高与质谱仪价格的下降, 同位素在水文学中的应用也越来越广泛, 主要集中在大气降水<sup>[1~9]</sup>, 河水, 地下水中稳定同位素变化趋势<sup>[10]</sup>, 同位素与气候关系<sup>[11]</sup>, 利用同位素分析了解地下水年龄、补给来源, 地下水资源评价<sup>[12~17]</sup>, 地表水与地下水相互交换<sup>[18,19]</sup>, 流量过程线分割<sup>[20~27]</sup>, 流域产流方式论证及水循环机理研究<sup>[28~30]</sup>, 流域坡面水流示踪研究<sup>[31~36]</sup>, 水库大坝渗漏等方面。

本文主要从三个方面: 同位素流量过程线分割、流域平均滞时与不同水源混合、与水文模型耦合, 讨论同位素示踪剂在流域水文模拟中的进展情况以及存在的问题, 并展望今后可能的研究方向和新的研究热点问题。

收稿日期: 2007-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50679024); 水利部公益性行业科研专项经费 (200701031); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助 (IRT0717); 河海大学自然科学基金 (2007418911)

作者简介: 瞿思敏 (1977 - ), 女, 湖北监利人, 副教授, 主要从事水文水资源、水环境及同位素水文等研究。

E-mail: wanily @hhu. edu. cn

# 1 同位素示踪剂在流域水文模拟中的应用

## 1.1 同位素流量过程线分割

关于同位素流量过程线分割,目前国际上比较认可的有三种划分方法<sup>[20]</sup>:

第一类为时间源划分方法,将径流划分为事件水和事件前水,有的文章中也称新水和旧水,含义一样。事件水一般由降雨产生,而事件前水指降雨事件前已经储存在土壤中的水分。

第二类是按产流机制的划分方法,一般将径流分为霍顿坡面径流,变源坡面径流或饱和坡面径流,壤中流,地下径流,栖息饱和径流等等。后来改进的三水源流量过程线划分方法<sup>[23~26]</sup>,四水源划分方法<sup>[37]</sup>都属于这类划分方法。

第三类是地理源划分方法,它是根据水流到达河道之前地理位置的不同来划分,比如之前是存储在饱和带还是包气带。最典型的是目标成分混合分析法<sup>[27,38]</sup>。

时间源划分方法仅提供事件水与事件前水的比例。对于流域水文模拟真正有意义的应该是产流机制划分方法。如果能找到产流成分与时间源成分之间的关系,就能更好地利用同位素数据。

### 1.1.1 时间源划分方法

时间源划分方法,也就是通常所说的二水源流量过程线划分方法。

#### (1) 基本假定<sup>[20]</sup>

地下水和基流是相等的,并且同位素组成不变;

降雨或融雪可用一个单一的同位素组成表示(即可用常数表示),或者可以预测其变化;

降雨与降雨之前的水分的同位素组成差异很大;

土壤水对流量过程线的贡献可以忽略,或者其同位素组成与地下水相同;

地表储蓄量对流量过程线的贡献可以忽略。

#### (2) 基本方程

主要由质量平衡方程和浓度平衡方程组成,即

$$Q_t = Q_{pe} + Q_e \quad (1)$$

$$C_t Q_t = C_{pe} Q_{pe} + C_e Q_e \quad (2)$$

式中  $Q_t$  为总流量;  $Q_e$ 、 $Q_{pe}$  分别为事件水和事件前水; 其相应的同位素浓度(用某种同位素表示,比如<sup>18</sup>O)分别为  $C_t$ 、 $C_e$ 、 $C_{pe}$ 。因为质谱仪测定的是  $\delta$  值,所以国外在应用式(2)时一般采用下面的形式:

$$\delta_t Q_t = \delta_{pe} Q_{pe} + \delta_e Q_e \quad (3)$$

联解式(1)、式(3),可得

$$Q_{pe} = \frac{\delta_t - \delta_e}{\delta_{pe} - \delta_e} Q_t, \quad Q_e = \frac{\delta_t - \delta_{pe}}{\delta_e - \delta_{pe}} Q_t \quad (4)$$

#### (3) 基本结论

在不同流域面积、不同植被覆盖、不同地质条件的流域上所作的二水源同位素流量过程线分割实验结果均表明,事件前水对流量过程线的贡献高达50%以上。这些研究结果进一步肯定了壤中流的产流机制,挑战了传统的霍顿坡面产流机制。同时,这些结果也存在不少问题,值得进一步研究。

#### (4) 存在问题

国外在应用式(3)时,一般假定  $\delta_e$  等于本次降雨中的同位素含量  $\delta_p$ , 但是  $Q_e$  不一定都来自降雨。顾慰祖在滁州水文实验基地做的实验结果表明<sup>[39]</sup>:  $Q_e$  与降雨的同位素含量是不同的,  $Q_e$  中非本次降雨贡献在0~50.5%之间变化。

不考虑  $\delta_p$  的时空变化。实际上,降雨中环境同位素组成除受降雨成因有关的因素包括气团源地、运行路径等影响外,还明显受气温、地形等条件影响,时空变化很大。McDonnell et al<sup>[22]</sup>在新西兰 Genda 2 流域对

同一次降雨事件采用不同的加权计算方法来计算  $p$ 。结果发现, 在过程线的涨洪段, 与考虑  $p$  时程变化的方法相比, 传统的方法会低估事件前水的贡献。Tayoko<sup>[40]</sup>在日本森林流域做的类似研究也表明, 是否考虑  $p$  的时程变化, 将会给计算结果带来 5%~10% 的偏差。

流域地下径流中的<sup>18</sup>O 在降雨径流过程中, 有很大的时程变化, 只有在枯季径流条件下其空间和时程变化才比较小。同样, 在流量过程线划分中将其作为常数也是不合理的。

忽略壤中流的影响也是不合理的, 很多实验表明, 壤中流对流量过程线的贡献是不可忽略的<sup>[41]</sup>, 否则将造成不合理的结果。

上述的大部分同位素流量过程线分割实验都是在比较湿润的森林流域进行的(年降水量 1 000~1 300 mm)。在湿润地区, 壤中流比较丰富, 所以事件前水(包含壤中流) 占的比例比较大, 但是在干旱地区, 缺水量大, 壤中流比较贫乏, 应该还是霍顿坡面径流占主要地位, 划分结果又会是怎样呢?

国内外在应用划分方程时都是用  $D$  值代替浓度。同位素分馏有时造成的差别本来就不是很大, 这样的简化是否合适?

### 1.1.2 产流机制划分方法

以三水源(三种水源定义为直接降雨, 土壤水和地下水) 同位素流量过程线分割为例进行分析。关于土壤水对径流形成的贡献的研究由来已久, 但是一直是水文界难于理解的方面。20 世纪 70 年代同位素流量过程线划分的研究, 把流量过程线划分为事件水和事件前水, 把土壤水和地下水混在一起称为事件前水, 但是把两者分开进行研究的并不多见, 一定程度上掩盖了每种成分单独的重要性。80 年代在 Pennsylvania 西南部 Laurel Hill 做的研究表明<sup>[42]</sup>, 只有土壤水作为主要输入才能解释观测到的溶解的铝的水平。由此, 开展了一系列关于三水源同位素流量过程线分割的实验研究<sup>[23~26]</sup>。

#### (1) 基本方程

$$Q_t = Q_s + Q_i + Q_g \quad (5)$$

$$Q_t D_t = Q_s D_s + Q_i D_i + Q_g D_g \quad (6)$$

$$Q_t {}^{18}O_t = Q_s {}^{18}O_s + Q_i {}^{18}O_i + Q_g {}^{18}O_g \quad (7)$$

式中  $D$ 、 ${}^{18}O$  分别为 D 和<sup>18</sup>O 示踪剂的同位素含量; 下标  $t$ 、 $s$ 、 $i$ 、 $g$  分别代表总流量、直接降雨、土壤水、地下水。将上面的式子写成向量形式:

$$\begin{bmatrix} Q_s \\ Q_i \\ Q_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ D_s & D_i & D_g \\ {}^{18}O_s & {}^{18}O_i & {}^{18}O_g \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ D_t \\ {}^{18}O_t \end{bmatrix} Q_t \quad (8)$$

将上式两边同除  $Q_t$ , 可得:

$$\begin{bmatrix} Q_s/Q_t \\ Q_i/Q_t \\ Q_g/Q_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ D_s & D_i & D_g \\ {}^{18}O_s & {}^{18}O_i & {}^{18}O_g \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ D_t \\ {}^{18}O_t \end{bmatrix} \quad (9)$$

令:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ D_s & D_i & D_g \\ {}^{18}O_s & {}^{18}O_i & {}^{18}O_g \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ D_t \\ {}^{18}O_t \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} Q_s/Q_t \\ Q_i/Q_t \\ Q_g/Q_t \end{bmatrix}$$

则:  $x = A^{-1}B$  (10)

式中  $x$  为各种水源所占比例的矩阵。

#### (2) 存在问题

三水源对二水源中存在的问题(4) 进行了改进, 但是仍然没有考虑  $p$  的时空变化, 以及壤中流与地下径流

同位素含量的时空变化。同时也带来了新的问题：如何测定这些径流成分？如何收集不同径流成分样品进行同位素分析？在小的实验流域上也许可以挖不同深度的壕沟进行观测，但是在大的天然流域又该如何来观测呢？

### 1.2 流域平均滞时与不同水源混合

关于流域洪水预报，已经有了很多比较成熟的水文模型，并且也都能获得比较高的精度。但是越来越突出的环境问题，比如酸雨沉积问题，污染物的运移问题，还有非点源污染问题，要求我们不仅关注河道流量，同时也要了解流域的一些内部过程，比如降雨是如何产生径流的，降雨降落到地面，停留多长时间流出流域，选择怎样的路径流出流域等等。

流域滞时是流域特性的一个基本描述符，它可以揭示关于水的存储，水流路径和水流来源各方面的信息，它是水流路径空间变异性的一个综合指标，并且与流域的一些内在过程密切相关<sup>[43]</sup>。流域滞时的分布能很好地描述流域是如何储存水份然后释放水流和溶质这个复杂的过程。比如，比较长的流域滞时说明壤中流的储存量比较大，也说明水流跟土壤有比较长的接触时间，也意味着在降雨输入通过流域作用最后达到出口断面的过程中水流有更多的时间进行生物地质化学反应。所以，如果能定量地描述流域平均滞时和流域滞时分布，就能很好地了解水文生物地质化学系统，也因此可以研究流域对人为输入和土地利用的敏感性。

流域滞时的分布虽然很重要，但是除了在一些能严格控制输入的实验基地外，我们很难用实验来精确测量，所以一般的做法是采用一些集总参数模型来描述流域滞时的分布。目前关于流域平均滞时的研究主要是根据同位素输入与系统响应函数(也称权函数)进行卷积，求出系统的同位素输出，然后对比模拟与实测的同位素输出，调整系统响应函数使拟合效果达到最佳。

流域滞时分布最基本的方程为

$$out(t) = \int_0^t g(\tau) in(t-\tau) d\tau \quad (11)$$

式中  $out(t)$  为流域的同位素输出； $in(t-\tau)$  为流域的同位素输入； $g(\tau)$  为流域响应函数，也就是流域滞时分布， $\tau$  表示输入与输出的滞时。

因为无法精确测量流域滞时分布，所以我们只能假定一些分布去模拟，常用的分布有活塞流模型<sup>[44]</sup>、指数模型<sup>[44]</sup>、指数-活塞流模型<sup>[44]</sup>、Gamma 分布模型<sup>[45]</sup>、两平行线性水库模型<sup>[43]</sup>等等。

#### 1.2.1 活塞流模型

活塞流模型是最简单的模型，它假定所有的水流路径速度都相同，并且水流长度也一样，这在实际流域是不可能的。它的分布函数为

$$g(\tau) = \delta(\tau - T) \quad (12)$$

式中  $T$  为流域平均滞时。

#### 1.2.2 指数模型

指数模型假定流域滞时呈指数分布，范围从 0 到  $\infty$ 。这个模型最初用于地下含水层的模拟，它反应的是一个完全混合的系统。一般用在跟整个流域滞时相比，非饱和带厚度比较短，滞时可以忽略的流域。它的分布函数为

$$g(\tau) = T^{-1} \exp(-\tau/T) \quad (13)$$

式中  $T$  为流域平均滞时。

#### 1.2.3 指数-活塞流模型

一般来说，用一个单参数模型来模拟实际系统是不现实的，所以我们采用两参数模型来模拟。指数-活塞流模型假定含水层由两部分组成，一部分滞时呈指数分布，另一部分滞时分布与活塞流模型类似，分布函数形式为：

$$g(\tau) = \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{\tau}{T} + \ln(1-\alpha)\right) \dots \text{for } \tau < T(1-\alpha^{-1}) \quad , \quad g(\tau) = 0 \dots \text{for } \tau > T(1-\alpha^{-1}) \quad (14)$$

式中  $\frac{Q}{Q_0}$  为总水量与分布为指数函数的水量之比,  $\alpha = 1$  时就是指数模型了,  $T$  为流域平均滞时。

#### 1.2.4 Gamma 分布或串联线性水库模型

Kirchner<sup>[45]</sup>在 Wales 的 Plynlimon 的三个源头流域对输入(降雨)和输出(河道流量)中的示踪剂浓度进行同步观测,通过谱分析方法解析输入、输出信号,然后对这些输入、输出信号进行反卷积运算,得出流域滞时分布函数为 Gamma 分布,其形式为

$$g(t) = \frac{\alpha^\beta}{\Gamma(\beta)} \exp\left(-\frac{\alpha t}{\beta}\right) \left(\frac{\alpha t}{\beta}\right)^{\beta-1} \quad (15)$$

式中  $\beta$  是形状参数;  $\alpha$  为尺度参数; 流域平均滞时为  $\frac{\beta}{\alpha}$ 。当  $\beta = 1$  时为指数模型。

#### 1.2.5 两平行线性水库模型

两平行线性水库模型是 Markus<sup>[43]</sup>在新西兰的 Maimai 流域,提出响应函数过程线分割模型时提出的,其分布函数为

$$g(t) = \frac{\phi}{f} \exp\left(-\frac{t}{f}\right) + \frac{1-\phi}{s} \exp\left(-\frac{t}{s}\right) \quad (16)$$

式中  $f$ 、 $s$  分别为快速水库和慢速水库的流域平均滞时;  $\phi$  为输入中进入快速水库的比例。

世界各地很多学者对不同大小的流域做了很多关于流域滞时的研究,得出流域平均滞时在  $< 1 \sim 5$  年之间变化。而流域滞时分布函数跟流域的水文地质特性,可利用的数据,以及数据拟合程度等有关,但是还没有得出一些基本的结论。比如 Markus<sup>[43]</sup>在新西兰的 Maimai 流域做的研究,采用 2 个模型评判准则(一个是 Nash and Sutcliffe<sup>[46]</sup>系数,还有一个是平方根准则<sup>[47]</sup>),得出两平行线性水库模型最合适的结论,因为该模型不仅拟合效果好,并且能抓住流域上主要的产流过程。

通过流域滞时,我们能很好地研究流域产流过程,水流路径,但是由于流域本身的复杂性,虽然这方面已经有很多研究,但是也存在不少问题<sup>[48]</sup>。

(1) 流域平均滞时模型的不确定性的定量研究,以及模型中参数的可识别性问题;

(2) 关于流域滞时的文章很多,但是真正流域尺度上的并不多见;

(3) 现行的很多方法和模型都是基于化学工程和地下水系统,如何把这些方法更好地应用在流域上,流域的响应十分复杂,很多主要控制过程都是时空变化的;

(4) 流域尺度上的集总参数模型有很多假定比如时不变、稳定、不考虑降雨输入的时空变化等等,这些简化会带来哪些问题?

### 1.3 与水文模型耦合

降雨径流模型在近几十年内发展迅速。随着计算机技术的提高,使得研制具有物理基础的大型分布式模型成为可能,比如 MIKE-SHE<sup>[49]</sup>。但是分布式模型需要大量的水文资料,这在一定程度上限制了它的应用。概念性降雨径流模型,比如 TOPMODEL<sup>[50]</sup>、新安江模型<sup>[51]</sup>和 HBV Model<sup>[52,53]</sup>,结构比分布式模型简单,易于使用,需要的数据也比较容易获得,但是,它也存在不少问题:

(1) 输入数据的不确定性 无论是遥测数据、遥感数据、卫星数据还是雷达数据,由于机器故障或者人为操作影响,不可避免地都会存在误差,如何定量研究这些误差及其给模型模拟结果带来的影响一直是水文界的热点研究问题。

(2) 模型结构的不确定性<sup>[54]</sup> 概念性降雨径流模型结构千差万别,具体应用到一个流域上,我们该如何选择模型?哪个模型结构最适合流域情况?我们该如何研制一个模型,使其参数最少,但又能捕捉哪些主要的产流过程?

(3) 参数的不确定性 异参同效问题<sup>[55]</sup>。也就是说不同的参数组合能得到相同的模拟结果。我们该选择哪组参数组合?之所以会有异参同效问题,是因为很多参数无法直接测量也无法通过流域特性推求,只能通过模型率定来确定这些参数。

(4) 模型预测的不确定性 概念性降雨径流模型结构的确定, 参数率定都是在已有观测数据的基础上发展建立起来的。这个模型用于未来不确定的, 历史上没有发生过的洪水事件的预报精度有多高? 拟合程度有多好? 模型与实际的物理过程有多接近等等都是值得研究的问题。

利用一些辅助数据, 比如同位素示踪剂浓度数据, 可以在一定程度上解决水文模型的这些问题。Uhlenbrook<sup>[56]</sup>在山区流域 Brugga 和 Zastler 所做同位素水文实验的基础上研制了一个示踪剂协助的流域模型。采用 3.2 年的日资料进行模拟计算, 除了比较实测与计算的日流量过程线, 还比较了河道实测与模拟的同位素浓度, 实测与同位素计算的径流成分比例等。通过这些数据的比较, 可以发现模型的缺陷, 对模型结构进行改进, 使模型结构更合理, 更接近实际流域, 同时也可以有多种数据来评价模型, 使模型的选择更客观。Vache<sup>[57]</sup>也曾将同位素估计的流域滞时数据用在水量水质耦合的概念性模型中, 结果表明引入流域滞时可以减少参数的不确定性, 给模型的评价和选择提供实验支持。

总的来说, 同位素示踪剂数据对于流域水文模型有如下作用:

(1) 为模型建立提供实验基础 同位素示踪剂数据能很好地捕捉流域上主要的产流过程, 通过同位素实验数据的分析, 我们可以知道模型中应该包含哪些过程, 哪些过程可以简化, 哪些过程可以忽略。

(2) 减少参数的不确定性 为我们选择合理的参数组合提供依据。

(3) 提高参数的可识别性 除了比较传统的流量过程, 我们还可以比较同位素浓度, 流域滞时分布, 流量过程线划分结果等, 这样可以限制参数的范围, 使得参数的选择更合理。

(4) 发现模型的不合理之处 改进模型结构, 给模型选择提供实验支撑 有些模型用于流量预报结果很好, 但是如果考虑同位素含量或者流域滞时分布等效果就会比较差, 这样我们就可以对模型结构进行修改或者选择其他更好的模型来模拟实际流域发生的情况。

## 2 新的研究方向与展望

同位素示踪剂, 因为其良好的守恒性, 不与土壤发生化学反应, 只有通过不同水源混合, 蒸发和凝结才改变其同位素含量, 正受到越来越多的关注, 在流域水文模拟中的应用也越来越广泛。本文仍然从三个方面来讨论新的研究方向和热点研究问题。

### 2.1 同位素流量过程线分割

Genereux<sup>[58]</sup>在 1998 年时提出了一个分析计算二水源与三水源同位素流量过程线分割不确定性的公式, 以二水源为例:

$$W_{ipe} = \sqrt{\left[ \frac{C_e - C_t}{(C_{pe} - C_e)^2} W_{cpe} \right]^2 + \left[ \frac{C_t - C_{pe}}{(C_{pe} - C_e)^2} W_{cce} \right]^2 + \left[ \frac{1}{(C_{pe} - C_e)} W_{ct} \right]^2} \quad (17)$$

式中  $W_x$  为  $x$  对应的不确定性, 其他字母含义同前。根据 Genereux 的分析, 同位素流量过程线分割结果受事件水的时间变化和事件前水的空间变化影响比较大。所以今后我们应该在这些方面加强研究。

(1) 考虑事件水的时间变化 比如我们可以采用顺序的降雨采集器<sup>[59]</sup>来代替传统的雨量收集器。传统的雨量收集器收集的是总的降雨, 我们在分析其同位素含量时把后续的降雨也考虑进来了, 这是不合理的。而实验研究也表明, 降雨的同位素含量有明显的时间变化, 采用顺序的降雨采集器就能避免这个问题, 得到更加准确的分割结果。

(2) 事件前水的空间变化 我们考虑多设几个壤中流和地下水的采样地点, 在坡度比较小的地方或者靠近河流的地方增加采样地点密度, 因为这些地方的水样同位素含量变化比较大。我们也可以用地质统计学的方法来定量或者模拟事件前水的空间变化。

(3) 采用更严格的质量平衡方程来进行同位素流量过程线分割计算。

(4) 滁州水文实验基地(水文山-Hydro Hill) 是进行同位素流量分割实验的理想实验基地 因为在水文山实验基地, 我们可以精确测量各种径流成分的含量, 并收集不同深度处的水样来进行同位素分析, 能很好地研究不

同水源的混合等等。

(5) 不同流域尺度对同位素流量分割结果影响比较大, 现在很多研究都是在比较小的森林流域进行的, 如何将其扩展到大流域尺度上? 如果扩展到大流域上, 有哪些需要注意的问题, 分割的结果又会有什么不同? 跟小流域的分割结果会有什么联系和差异? 同位素流量过程线分割结果跟流域大小之间是否具有相关性?

(6) 不同的水文气象条件对产流机制影响比较大, 也直接影响同位素流量过程线分割结果。目前大部分研究都集中在小的湿润的森林流域, 我们应该考虑在不同的地质地形, 不同水文气象条件下进行同位素流量分割实验, 比较结果, 讨论水文气象条件与同位素流量过程线分割结果之间的相关性。

## 2.2 流域平均滞时与不同水源混合

流域平均滞时对于研究流域产流机制, 水流路径, 不同水源混合程度研究有重要意义。今后应加强以下几方面的研究:

(1) 降雨输入同位素的时空变化问题。

(2) 观测数据系列长度问题, 这个对参数估计很重要。

(3) 河道测流方法与频率 该选择怎样的测流频率, 是每月测流, 还是每周, 每天, 或是每小时测流? Kirchner<sup>[60]</sup>对比分析了 Wales 的 Plynlimon 的 Hore 河流量不同时间尺度的传导度, 结果表明, 如果采用比较长的时间间隔进行, 可能会掩盖其固有的一些变化规律, 所以应该根据所用的模型来选择适当的测流频率。

(4) 选择合适的滞时分布函数 滞时分布函数的选择对模拟结果影响很大, 应根据流域的具体特性, 资料情况, 模型评判准则选择合适的滞时分布函数。

(5) 模型评价准则 采用不同的模型评判准则可能会得到不同的结果, 所以应根据具体情况选择合适的多目标模型评判准则来对不同的滞时分布模型进行评判。

(6) 滞时分布模型的不确定性与参数可识别性问题 滞时分布模型严格意义上来讲属于黑箱子模型, 它只是根据输入和输出的同位素信号来确定滞时分布, 所以有很大的不确定性, 需要有一套计算方法来对这个不确定性进行定量研究。另外, 采用多参数模型有可能提高模拟效果, 但是会增加参数个数, 带来参数的可识别性问题等等。

## 2.3 与水文模型耦合

水文模型的发展正处于一个重要的发展时期, 该如何扩大模型利用的信息量, 使模型结构更合理, 模型评判更客观? 利用同位素观测数据可以在一定程度上解决水文模型中的一些问题。

今后应该考虑在水文模型中引入更多的气文观测数据(比如地下水位的观测、土壤含水量分布、降雪覆盖深度、遥感数据等)与同位素数据(降雨同位素的时空变化、土壤水同位素含量的空间变化、地下水同位素含量的变化、河道流量的同位素变化等), 降低模型参数的不确定性, 提高模型结构合理性, 降低模型预测的不确定性等。

同时, 应该考虑多维评价准则来对模型进行评判, 而不应该仅限于流量过程。

(1) 对于模拟结果, 应该采用多目标函数进行评价;

(2) 从模型预测的不确定性来评价模型;

(3) 从参数的可识别性来评价模型;

(4) 从是否反应客观实际来评价模型。所有这些都是为了改善模型结构, 使选择模型变得更客观合理。

## 参考文献:

- [1] 顾慰祖, 陆家驹, 唐海行, 等. 水文实验求是传统水文概念[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 368 - 378. (GU Wei-zu, LU Jia-ju, TANG Hai-xing, et al. Challenges of basin study to traditional hydrological conceptions[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 368 - 378. (in Chinese))
- [2] SIMPKINS W W. Isotopic composition of precipitation in central Iowa[J]. J Hydrol, 1995, 172: 185 - 207.
- [3] LONGINELLI A, SELMO E. Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map[J]. J Hydrol, 2003, 270: 75 - 88.

- [4] ZHANG Xin-ping, TAO Tan-dong, MASA YOSHI N. Oxygen 18 in present-day precipitation on the Tibetan Plateau[J]. Science in China (Series E), 2001, 44: 41 - 47.
- [5] ZHANG Xin-ping, MASA YOSHI N, KOJI F, *et al.* Variation of precipitation 18O in Langtang Valley, Himalayas[J]. Science in China (Series D), 2001, 44(9): 769 - 778.
- [6] 章新平, 谢自楚, 姚檀栋. 降落雨滴中稳定同位素比率变化的数学模拟[J]. 气象学报, 1998, 56(1): 87 - 95. (ZHANG Xin-ping, XIE Zi-chu, YAO Tang-dong. Mathematical modeling of variation on stable isotopes in falling drop[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1998, 56(1): 87 - 95. (in Chinese))
- [7] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994, 23(1): 33 - 41. (WEI Ke-qin, LIN Rui-fen. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China[J]. Geochimica, 1994, 23(1): 33 - 41. (in Chinese))
- [8] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 18O 的分布特点[J]. 地理学报, 1998, 53(4): 356 - 364. (Zhang Xin-ping, YAO Tang-dong. Distributional features of 18O in precipitation in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(4): 356 - 364. (in Chinese))
- [9] 赵珂经, 顾慰祖, 顾文燕, 等. 中国降水同位素站网[J]. 水文, 1995(5): 25 - 27. (ZHAO Ke-jing, GU Wei-zu, GU Wen-yan, *et al.* Isotopic observations of precipitation in China[J]. Journal of China Hydrology, 1995(5): 25 - 27. (in Chinese))
- [10] MEBUS A G, 顾慰祖, 刘涌, 等. 阿拉善高原地下水的稳定同位素异常[J]. 水科学进展, 1998, 9(4): 333 - 337. (MEBUS A G, GU Wei-zu, LIU Yong, *et al.* Isotopically anomalous groundwater of Alxa Plateau, Inner Mongolia[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(4): 333 - 337. (in Chinese))
- [11] MOORMAN B J, MICHEL F A, DRIMMIE R J. Isotopic variability in Arctic precipitation as a climate indicator[J]. Geoscience Canada, 1996, 23: 189 - 194.
- [12] 顾慰祖, 林曾平, 费光灿, 等. 环境同位素硫在大同南寒武-奥陶系地下水资源研究中的应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 14 - 20. (GU Wei-zu, LIN Zeng-ping, FEI Guang-chan, *et al.* The use of environmental sulphur isotopes in the study of the Cambrian-Ordovician aquifer system in the south of Datong[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 14 - 20. (in Chinese))
- [13] 顾慰祖, 陆家驹, 谢民, 等. 乌兰布和沙漠北部地下水资源的环境同位素探讨[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 326 - 332. (GU Wei-zu, LU Jia-ju, XIE Min, *et al.* Environmental isotope study of the groundwater resources in the North Wular-Buhe desert, Inner Mongolia [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 326 - 332. (in Chinese))
- [14] 蔡明刚, 黄奕普, 陈敏, 等. 厦门岛南岸地下水的氢氧同位素的示踪研究[J]. 海洋科学, 2003, 27(9): 1 - 6. (CAI Ming-gang, HUANG Yi-pu, CHEN Min, *et al.* The study of hydrogen and oxygen isotopes of coastal groundwater in Xiamen Island[J]. Marine Science, 2003, 27(9): 1 - 6. (in Chinese))
- [15] 顾慰祖, 陆家驹, 费光灿, 等. 铀系不平衡在大同南寒武-奥陶系地下水资源研究中的应用[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 177 - 184. (GU Wei-zu, LU Jia-ju, FEI Guang-chan, *et al.* Uranium disequilibrium in the Cambrian-Ordovician aquifer system of southwest Datong and its application for groundwater research[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(2): 177 - 184. (in Chinese))
- [16] KATTAN Z. Environmental isotope study of the major karst springs in Damascus limestone aquifer systems: case of the Fiegh and Barada springs[J]. J Hydrol, 1997, 193: 161 - 182.
- [17] JAMES E R, MANGA M, ROSE T P, *et al.* The use of temperature and the isotopes of O, H, C, and noble gases to determine the pattern and spatial extent of groundwater flow[J]. J Hydrol, 2000, 237: 100 - 112.
- [18] SUKHJA B S, RESSY D V, NAGABHUSHANAM P, *et al.* Patil. Environmental and injected tracers methodology to estimate direct precipitation recharge to a confined aquifer[J]. J Hydrol, 1996, 177: 77 - 97.
- [19] GURRIERI J T, FURNISS G. Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass balance methods[J]. J Hydrol, 2004, 297: 187 - 208.
- [20] SKLASH M G, FARVOLDEN RN. The role of groundwater in storm runoff[J]. J Hydrol, 1979, 43: 46 - 65.
- [21] 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. (GU Wei-zu, XIE Min. Research on hydrograph separation of Tengqiao Catchment using isotopic tracer method[J]. Journal of China Hydrology, 1997(1): 29 - 32. (in Chinese))
- [22] MCDONNELL J J, BONELL M, STEWART M K, *et al.* Deuterium variations in storm rainfall: implications for hydrograph separation[J]. Water Resour Res, 1990, 26: 455 - 458.
- [23] DEWALLE D R, SWISTOCK, B R, SHARPE W E. Three-component tracer model for streamflow on a small Appalachian forested catchment



- [J]. *J Hydrol*, 1998, 104: 301 - 310.
- [24] OGUNKOU YA O O, JENKINS A. Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model [J]. *J Hydrol*, 1993, 142: 71 - 88.
- [25] BAZEMORE D E, ESHLEMAN K N, HOLLENBECK K J. The role of soil water in stormflow generation in a forested headwater catchment: synthesis of natural tracer and hydrometric evidence[J]. *J Hydrol*, 1994, 162: 47 - 75.
- [26] BROWN V A, MCDONNELL J J, BURNS D A, *et al.* The role of event water, a rapid shallow flow component, and catchment size in summer stormflow[J]. *J Hydrol*, 1999, 217: 171 - 190.
- [27] CHRISTOPHERSEN N, HOOPER R P. Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of principal components analysis for the end-member mixing problem[J]. *Water Resour Res*, 1992, 28: 99 - 107.
- [28] 顾慰祖. 集水区降雨径流响应的环境同位素实验研究[J]. *水科学进展*, 1992, 3(4): 246 - 254. (GU Wei-zu. Various patterns of basin precipitation-runoff response using environmental isotopes[J]. *Advances in Water Science*, 1992, 3(4): 246 - 254. (in Chinese))
- [29] 张志强, 王礼先, 余新晓, 等. 森林植被影响径流形成机制研究进展[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 79 - 84. (ZHANG Zhi-qiang, WANG Li-xian, YU Xin-xiao, *et al.* Impacts of forest vegetation on runoff generation mechanisms: a review[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 79 - 84. (in Chinese))
- [30] 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. (SONG Xianfang, XIA Jun, YU Jingjie, *et al.* The prospect in the research of water cycle at the typical catchments of North China Plain using environmental isotopes[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(6): 527 - 537. (in Chinese))
- [31] MCCLYNN 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.
- [32] SCRIMGEOUR C M. Measurement of plant and soil water isotope composition by direct equilibration methods[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 172: 261 - 274.
- [33] 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.
- [34] SHURBAJ I 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.
- [35] KENDALL C, MCDONNELL J J. *Isotope tracer in catchment hydrology*[M]. New York: Elsevier, 1998. 839.
- [36] ARAGUAS L A, ROZANSKI K, CONFANTINI R, *et al.* Isotope effects accompanying vacuum extraction of soil water for stable isotope analyses[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 168: 159 - 171.
- [37] LEE E S, KROTHER N C. A four-component mixing model for water in a karst terrain in south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers[J]. *Chemical Geology*, 2001, 179: 129 - 143.
- [38] APRIL L J, NIGEL T R. Investigating the applicability of end-member missing analysis (EMMA) across scale: A study of eight small, nested catchments in a temperate forested watershed[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42, W08434.
- [39] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用. *水科学进展*, 2006, 17(5): 738 - 747. (ZHANG Ying-hua, WU Yan-qing, WEN Xiao-hu, *et al.* Su Jianping. Application of environmental isotopes in water cycle[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(5): 738 - 747. (in Chinese))
- [40] TAYOKO K, YOSHIO T. Intra- and inter-storm oxygen-18 and deuterium variations of rain, throughfall, and stemflow, and two-component hydrograph separation in a small forested catchment in Japan[J]. *J for Res*, 2003, 8: 179 - 190.
- [41] ANDERSON M G, BURT (Editors) T P. *Process Studies in Hillslope Hydrology*[M]. New York: Wiley, 1990. 401 - 435.
- [42] SHARPE W E, DEWALLE D R, DINICOLA R S, *et al.* Causes of acidification of four streams on Laurel Hill in southwestern Pennsylvania [J]. *J Environ Qual*, 1984, 13: 619 - 631.
- [43] MARKUS W, BRIAN L M, KELVIN J M, *et al.* How does rainfall become runoff? A combined tracer and runoff transfer function approach [J]. *Water Resour Res*, 2003, 39(11): 1315.
- [44] MALOSZEWSKI P, ZUBER A. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. 1. Models and their applicability[J]. *J Hydrol*, 1982, 57: 207 - 231.
- [45] KIRCHNER J W, FENG Xia-hong, NEAL C. Fractal stream chemistry and its implication for contaminant transport in catchments[J]. *Nat*

- ture, 2000, 403, 524 - 527.
- [46] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles[J]. *J Hydrol*, 1970, 10:282 - 290.
- [47] LEGATES D R, MCCABE G J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation[J]. *Water Resour Res*, 1999, 35, 233 - 241.
- [48] KECIN J M, JEFFREY J M. A review and evaluation of catchment transit time modeling[J]. *J Hydrol*, 2006, 330, 543 - 563.
- [49] ABBOTT M B, REFSGAARD (eds). *Distributed Hydrological Modelling*[M]. Kluwer Academic: Dordrecht, Netherlands, 1996. 41 - 54.
- [50] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43 - 70.
- [51] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (ZHAO Ren-jun. *Watershed hydrological modeling*[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1984. (in Chinese))
- [52] BERGSTRÖM S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments[R]. Norrköping: SMHI, 1976.
- [53] BERGSTRÖM S. The HBV model-its structure and applications[R]. Norrköping SMHI 1992.
- [54] SEIBERT J. Conceptual runoff models-fiction or representation of reality? [D]. Uppsala: Acta University Uppsala, 1999.
- [55] BEVEN K J, BINLEY A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction[J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6: 279 - 298.
- [56] UHLENBROOK S, LEIBUNDGUT C H. Process-oriented catchment modelling and multi-response validation[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16: 423 - 440.
- [57] KELLIE B V, JEFFREY J M. A process-based rejectionist framework for evaluating catchment runoff model structure[J]. *Water Resour Res*, 2006, 42: W02409.
- [58] DAVID Genereux. Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separations[J]. *Water Resour Res*, 1998, 34(4): 915 - 919.
- [59] KENNEDY V C, ZELLWEGER G W, AVANZINO. Variation of rain chemistry during storms at two sites in Northern California[J]. *Water Resour Res*, 1979, 15: 687 - 702.
- [60] KIRCHNER J W, FENG Xia-hong, NEAL C, *et al.* Robson, 2004. The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18, 1353 - 1359.

## Isotope tracer in watershed hydrological modeling<sup>\*</sup>

QU Si-min<sup>1,2,3</sup>, BAO Wei-min<sup>1,2</sup>, Jeffrey J. McDonnell<sup>3</sup>, YU Zhong-bo<sup>1</sup>, SHI Peng<sup>1</sup>

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

2. *College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

3. *Department of Forest Engineering, Oregon State University, Corvallis, Oregon, 97330 USA)*

**Abstract:** The objectives of this study are to present the applications and assumptions and problems in the application of isotope tracer in watershed hydrological modeling and promote new advances and new research directions. An evaluation and review of the application of isotope tracer in watershed hydrological modeling are presented in the paper. It is motivated by new and emerging interests in isotope tracer application in hydrological modeling and the need to classify different directions. The review is focused on three issues including: (1) isotopic hydrograph separation, (2) mean residence time and mixing, and (3) coupled with hydrological model. Additionally, the review provides a critical analysis of unresolved issues when applied in watershed hydrological modeling. These issues include: (1) temporal and spatial variation of isotopic concentration of precipitation, (2) sampling of different runoff, (3) spatial variation of isotopic concentration of different runoff, (4) the distribution function of mean residence time, and (5) coupled hydrological and isotopic model.

**Key words:** isotope; hydrograph separation; three-component; mean residence time; conceptual hydrological model

<sup>\*</sup> The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50679024).