

# Application of Isotopic Information for Estimation of Parameters in Concentration Model\*

Tao Wang<sup>1</sup>, Weimin Bao<sup>2</sup>, Haili Xu<sup>1</sup>, Ming Li<sup>1</sup>, Chao Liu<sup>1</sup>, Haozhong Zhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hydrochina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing  
Email: wangtaogo@163.com

Received: May 2<sup>nd</sup>, 2012; revised: Jun. 16<sup>th</sup>, 2012; accepted: Jun. 27<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** Hillslope concentration is an important component of concentration in catchment. Based on designed rainfall-runoff experiment in trough and the linear reservoir concentration model, the total discharges of trough were separated into two-component water sources: direct precipitation and soil water. The parameters of concentration model were estimated by using isotopic and hydrologic information. The experimental results showed that recession coefficients of direct precipitation and soil water in concentration model could be individually estimated by using isotopic information, and that the uncertainty of parameters were effectively reduced. The result of parameter estimation was affected by the errors of hydrograph separation.

**Keywords:** Isotopic Information; The Linear Reservoir Model; Parameter Estimation; Concentration

## 同位素信息确定汇流模型参数研究\*

王涛<sup>1</sup>, 包为民<sup>2</sup>, 徐海丽<sup>1</sup>, 李铭<sup>1</sup>, 刘超<sup>1</sup>, 钟毫忠<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 成都

<sup>2</sup>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  
Email: wangtaogo@163.com

收稿日期: 2012年5月2日; 修回日期: 2012年6月16日; 录用日期: 2012年6月27日

**摘要:** 坡地汇流过程是流域汇流的重要组成部分。基于设计的室内土槽降雨径流同位素实验, 以线性水库汇流模型为例, 利用同位素信息分割流量过程线为直接降雨和土壤水两种水源, 与水文信息相结合, 确定线性水库汇流模型参数。实验结果表明, 利用同位素信息可以分别确定线性水库汇流参数直接降雨消退系数和土壤水消退系数, 在一定程度上可以降低参数确定的不确定性。同位素流量过程线分割中误差累积对利用同位素信息确定线性水库汇流参数结果有一定影响。

**关键词:** 同位素信息; 线性水库; 参数确定; 汇流

### 1. 引言

不同的径流成分, 汇流路径和汇流时间不同, 将导致流域出口断面的流量过程线不同。研究流域坡地汇流阶段不同径流成分的汇流特性对预报流量和流

域内水资源评价具有重要的作用。传统的水文方法获取地面以下径流在土壤中的运移过程信息比较有限, 而氢氧同位素是较好的保守示踪剂, 能够用来分割不同径流成分, 并示踪不同径流成分汇流路径和流域滞时<sup>[1,2]</sup>, 为流域水文模型汇流参数率定提供大量有用信息。汇流参数的率定主要基于流域出口断面的流量数据, 再结合相应目标函数实现。由于传统的斜割法很

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679024, 40901015)。

作者简介: 王涛(1982-), 男, 工程师。

难在物理意义上分割流量过程线<sup>[3]</sup>, 导致率定参数信息量不足, 引起率定汇流模型参数时发生“异参同效”现象。同位素分割流量过程线方法具有严格的物理基础, 能够根据实际情况将流量过程线划分不同水源, 增加建模可利用信息量, 降低参数的不确定性。本文选择模型结构较简单、具有一定物理基础的线性水库汇流模型为例, 基于设计的室内土槽降雨径流实验, 利用氢氧同位素信息分割流量过程线, 与水文信息结合, 确定线性水库汇流模型参数。

## 2. 室内土槽降雨径流实验

室内土槽降雨径流实验时间为2007年6月29日至30日, 地点在河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室的降雨大厅。实验所用土槽结构见图1, 土槽长为12.1 m, 宽为3.35 m, 高为1.2 m。土槽四周和底部均为混凝土构成, 中间有两个高15 cm的不透水混凝土隔墙将土槽分隔为三等分, 隔墙一侧有一个出水孔。将土槽从上至下依次标记为1、2、3号土槽, 水流最终从3号土槽出口处流出土槽。土槽上高下低, 倾斜的坡度为6°。土壤取自南京市汤山镇山坡表土, 为黏性土壤, 受人类活动影响较小。土壤在自然条件下风干, 尽量粉碎均匀后铺到土槽中, 土层厚15 cm。用TDR(时域反射仪)测得土槽中初始土壤体积含水量为3.2%。

实验中降雨方式为线降雨, 即在1号土槽上端安装一根直径为2 cm的橡皮管, 管的一端接在自来水管上面, 另外一端封闭, 在管上均匀扎一排孔。实验期间, 降雨强度保持不变, 出流速度为139.8 cm<sup>3</sup>/s, 折算到整个土槽面积上的面降雨强度为12.4 mm/h。降雨开始时间为6月29日9:40, 18:30时降雨结束,

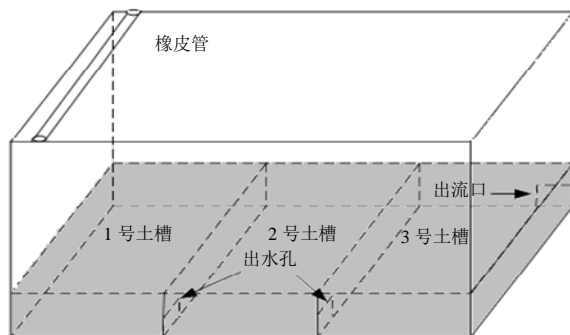


Figure 1. Trough of rainfall-runoff experiment<sup>[4]</sup>  
图1. 实验土槽结构示意图<sup>[4]</sup>

历时8.83 h。经观测, 13:02时在1号土槽出水孔出流, 16:15时在2号土槽出水孔出流, 18:20时在3号土槽出水孔出流。在3号土槽出流后, 水流流量迅速增大, 25 min后, 将1号、2号土槽隔墙的出水孔堵塞, 3号土槽中开始退水, 160 min后室内土槽降雨径流实验结束。实验降雨开始前和结束后各取一个降雨水样, 经分析, 降雨开始前 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值分别为-51‰和-7.7‰, 降雨结束时 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值分别为-61‰和-8.4‰, 可见实验期间人工降雨的氢氧稳定同位素组成慢慢贫化, 存在时程变化。

测流和取样。在3号土槽出口处用一透明有机玻璃薄壁三角堰测流。测流同时用30 mL塑料瓶在薄壁三角堰中取样。整个实验期间, 室内平均气温为28.0℃, 平均相对湿度为78%。水样 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 数据在北京国土资源部同位素实验室用MAT-253气体质谱仪进行测定,  $\delta D$ 测样精度为 $\pm 2\%$ ,  $\delta^{18}O$ 测样精度为 $\pm 0.2\%$ 。

## 3. 实验结果分析

### 3.1. 土槽出流氢氧同位素变化

图2为2号土槽与3号土槽中间隔墙出水孔处采集水样的 $\delta^{18}O$ 值随时间变化情况。3号土槽受2号土槽出水孔流出的水流补给。从图2可知, 补给3号土槽土壤的水 $\delta^{18}O$ 值稳定在-8.3‰。结合实验降雨开始前和结束后测得的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值, 可以推测, 在补充2号土槽土壤中水分过程中, 降雨 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值已经从初始的-51‰和-7.7‰, 变化到-61‰和-8.4‰。3号土槽土壤有水分补给时, 1号、2号土槽的土壤已经处于蓄满状态, 并有积水出现, 降雨直接形成地面径流, 迅速流经这两个土槽表面土壤来补给3号土槽。

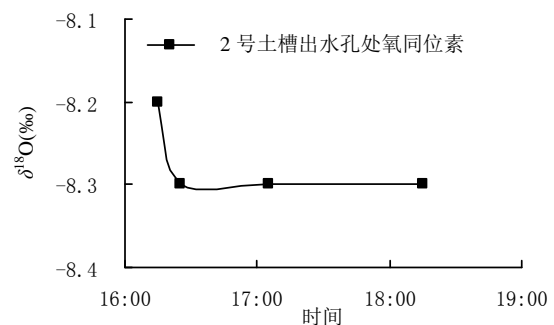


Figure 2. The variation of  $\delta^{18}O$  values at outlet of trough 2  
图2. 2号土槽出水孔处水流 $\delta^{18}O$ 值随时间变化

此时, 降雨与土壤水混合交换较少, 维持补给3号土槽土壤的水流同位素组成稳定。

图3为3号土槽出流口水流氢氧稳定同位素组成和流量变化过程图。水流的 $\delta D$ 值变化范围为 $-59\text{‰} \sim -44\text{‰}$ , 平均值为 $-55\text{‰}$ ,  $\delta^{18}O$ 值变化范围为 $-8.3\text{‰} \sim -6.3\text{‰}$ , 平均值为 $-8.1\text{‰}$ 。由图3可知, 随着水流流量增大,  $\delta D$ 值逐渐减小, 在流量达到最大值时 $\delta D$ 值最小, 为 $-59\text{‰}$ 。在退水阶段, 流量迅速减小, 水流中 $\delta D$ 值增大,  $\delta D$ 值波动幅度为 $14\text{‰}$ , 比补充3号土槽的降雨同位素值富集重同位素。水流 $\delta D$ 值与流量呈负相关关系, 即流量越大,  $\delta D$ 值越小。水流 $\delta^{18}O$ 变化趋势与 $\delta D$ 相同, 流量最大时对应 $\delta^{18}O$ 值为 $-8.3\text{‰}$ , 波动幅度为 $2\text{‰}$ 。3号土槽出流的流量过程线呈现陡涨陡落型。由于土槽土壤厚约 $15\text{ cm}$ , 初始土壤含水量较低, 土槽底部为不透水混凝土边界, 不存在地下水, 因此, 可认为观测的径流为直接径流。在本文实验中, 直接径流由直接降雨和土壤水这两种水源组成。

### 3.2. 同位素流量过程线分割结果

利用同位素信息确定汇流模型参数需分割流量过程线。实验中, 初始土壤含水量很低, 土层较薄, 土槽下边界是不透水边界, 不存在地下水径流成分, 观测到的水流均可以作为直接径流。根据室内土槽降雨径流实验实际情况, 将观测到的直接径流流量过程线划分为直接降雨和土壤水两种水源。两水源同位素流量过程线分割方程为<sup>[5,6]</sup>:

$$Q_{tot} = Q_p + Q_{sw} \quad (1)$$

$$\delta_{tot} Q_{tot} = \delta_p Q_p + \delta_{sw} Q_{sw} \quad (2)$$

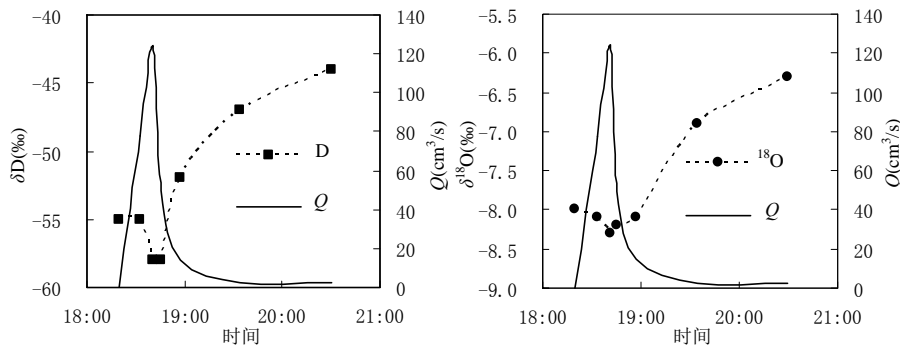


Figure 3. The isotopic and discharge variations at outlet of trough 3  
图3. 3号土槽出流口水流 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值及流量过程线变化

式中,  $Q_{tot}$ 、 $Q_p$ 、 $Q_{sw}$ 分别表示坡地总径流(直接径流)、直接降雨、土壤水的流量,  $\delta_{tot}$ 、 $\delta_p$ 、 $\delta_{sw}$ 分别表示总径流、直接降雨、土壤水的氢氧同位素组成。通过式(1)和(2)可计算得到直接降雨流量 $Q_p$ 和土壤水流量 $Q_{sw}$ 。土槽出流中氢同位素和氧同位素均可以用来划分流量过程线, 但水样氧同位素测样精度比氢同位素高, 且氢氧同位素具有较强的线性关系, 因此, 本文仅采用氧同位素数据来分割流量过程线。同位素方法分割流量过程线结果见图4。利用氢氧同位素分割流量过程线时, 考虑到输入的降雨量比较大, 而实验时间不长, 室内通风性较差, 气温不是很高, 可忽略蒸发分馏对产汇流过程中水体氢氧同位素的影响。

从图4可知, 直接降雨径流成分是流量过程线的主要组成部分, 占总径流量的 $92.6\%$ , 洪峰流量中直接降雨所占比例为 $97.7\%$ , 符合本文实验情况。因为室内土槽降雨径流实验中补充土壤水分全部由人工降雨提供。降雨在补充土壤水分过程中, 与土壤中本身所含土壤水进行混合稀释, 水流同位素组成将发生变化。土壤中初始土壤水被降雨混合稀释、裹挟和驱替出土壤形成径流而向下流动<sup>[2]</sup>。从流量过程线分割结果可以看到, 土壤水和直接降雨是同时出流, 两者混合在一起, 混合水的同位素变化可以利用混合模型计算<sup>[7]</sup>, 且土壤水占总径流量比例较小。

### 3.3. 线性水库汇流模型参数确定

#### 3.3.1. 水文信息确定线性水库汇流模型参数结果

在确定汇流参数前, 需进行产流和分水源计算。由于汇流参数确定基于室内实验, 与实际流域情况有较大差别, 必须对产流和分水源过程作相应简化处理。

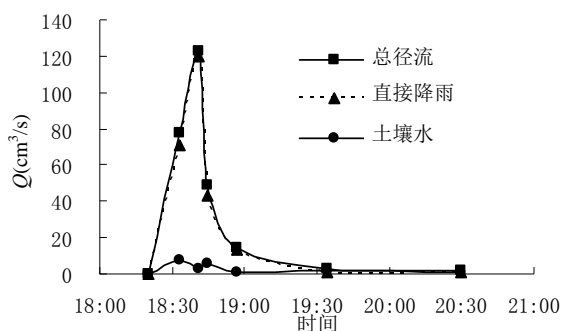


Figure 4. The result of hydrograph separation  
图4. 同位素流量过程线分割结果

产流计算。室内土槽降雨径流实验期间, 从3号土槽出口处有出流至实验结束, 共计130 min, 时间较短, 因此, 将计算时段间隔设为5 min。本文将土槽出流前的降雨全部补充土壤水分, 而出流后降落在土槽中的降雨对产流有贡献, 作为蓄满产流方式。

水源划分。本文采用基于霍尔顿(Horton)产流概念将产流量分割为直接降雨和土壤水两种水源。基于同位素流量过程线分割得到的直接降雨和土壤水比例, 将每个时段的产流量按比例分割为直接降雨和土壤水成分。

汇流计算。直接降雨和土壤水汇流采用线性水库进行计算, 其方程如下:

$$QP_t = CP \cdot QP_{t-1} + (1 - CP) \cdot RP_t \cdot U \quad (3)$$

$$QSW_t = CSW \cdot QSW_{t-1} + (1 - CSW) \cdot RSW_t \cdot U \quad (4)$$

式中  $QP$ 、 $QSW$  分别为直接降雨径流和土壤水径流,  $m^3/s$ ;  $RP$ 、 $RSW$  分别直接降雨和土壤水径流量,  $mm$ ;  $CP$ 、 $CSW$  分别为直接降雨和土壤水径流消退系数;  $U$  为单位换算系数,  $U = \frac{\text{流域面积} F (km^2)}{3.6\Delta t (h)}$ 。根据产

流和分水源结果, 结合线性水库汇流模型公式(3)和(4), 计算坡地汇流总径流过程, 以计算总径流流量和实测流量误差平方和最小为目标函数, 确定直接降雨和土壤水径流消退系数  $CP$  和  $CSW$ , 其值分别为0.55和0.95, 作为水文信息确定的线性水库汇流模型参数。

### 3.3.2. 同位素信息确定线性水库汇流模型参数结果

同位素信息确定线性水库汇流模型参数  $CP$  和  $CSW$ 。与水文信息确定线性水库汇流模型参数过程不同, 同位素信息确定模型参数的方法是通过式(3)和(4)

来分别计算直接降雨和土壤水径流过程, 并与分割好的直接降雨和土壤水径流过程曲线进行对比(图4), 以流量误差平方和最小为目标函数, 分别求取直接降雨和土壤水的消退系数  $CP$  和  $CSW$ 。流量误差平方和最小时对应的直接降雨和土壤水消退系数  $CP$  和  $CSW$  分别为0.59和0.80, 这两个参数值作为同位素信息确定的汇流模型参数结果。

表1为同位素信息和水文信息确定线性水库汇流模型参数结果统计。在本实验中, 同位素信息确定的参数代入汇流模型模拟的总径流流量误差平方和比水文信息确定的参数模拟结果大, 但洪峰误差较小。同位素信息确定的土壤水消退系数为0.8, 与实际流域的土壤水汇流消退系数有一定差异, 有待进一步研究。但同位素信息可以增加建模可利用信息量, 可实现对线性水库汇流模型中每个参数进行单独率定, 在一定程度上降低参数的不确定性。

同位素信息确定线性水库模型参数本质是利用同位素信息将直接降雨和土壤水径流成分从总径流过程线中分割出来, 通过汇流模型分别拟合分割出来流量过程线, 反演汇流模型参数, 减小参数不确定性。因此, 在本实验中, 同位素方法分割流量过程线结果的误差是确定线性水库汇流模型参数的误差主要来源。而同位素方法分割流量过程线受到直接降雨同位素组成的时程变化和土壤水同位素空间变化综合影响。在室内土槽降雨径流实验中, 降雨同位素组成  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值分别从  $-51\text{‰}$  和  $-7.7\text{‰}$  变化为  $-61\text{‰}$  和  $-8.4\text{‰}$ , 在时程上存在变化。降雨同位素组成的时程变化将引起降雨与土壤水混合过程中混合水同位素发生变化。但在本实验2号土槽出水孔处监测的  $\delta^{18}O$  值可知, 补充3号土槽的降雨  $\delta^{18}O$  值稳定在  $-8.3\text{‰}$  左右, 对流量过程线分割影响较小。由于受到土壤前期蒸发分馏的影响, 土槽中初始土壤水同位素组成在空间上分布不均, 波动较大, 同时很难对土壤水同位素组成进行监测。降雨同位素时程变化和土壤水同位

Table 1. The parameters of linear reservoir concentration estimated by using isotopic and hydrologic information  
表1. 水文信息和同位素信息确定线性水库汇流模型参数统计结果

参数确定方式	$CP$	$CSW$	总流量误差平方和	洪峰相对误差(%)
水文信息	0.55	0.95	494.7	-3.03
同位素信息	0.59	0.80	637.9	-2.75

素空间变化两者将综合影响同位素方法分割流量过程线结果, 特别是土壤水流量较小, 分割误差较大, 影响同位素信息确定汇流模型参数。水样氢氧同位素测样误差对流量过程线分割结果影响已在很多文献中作了分析, 当直接降雨和土壤水同位素组成差别越大, 流量过程线分割结果误差越小<sup>[8]</sup>。

#### 4. 结语

坡地汇流是流域汇流的重要组成部分, 水流在此阶段与流域下垫面充分接触, 受到流域的调蓄, 各种径流成分发生交换, 影响流域出口断面的流量过程线。坡地汇流过程的研究对流域水文预报有很重要的作用。本文基于室内土槽降雨径流实验, 通过同位素方法将流量过程线分割为直接降雨和土壤水两种径流成分, 分别利用水文信息和同位素信息确定线性水库汇流模型参数, 得到以下结论:

1) 基于室内降雨径流实验, 利用氧同位素信息将流量过程线分割为直接降雨和土壤水两种径流成分, 计算得到直接降雨占总径流量的主要部分, 比例高达92.6%。由于实验所用土壤含水量较低, 总径流量中土壤水比例非常低。

2) 利用同位素信息与水文信息结合, 可以分别确定直接降雨和土壤水这两种径流成分的线性水库汇流模型参数, 在一定程度上降低参数的不确定性。

3) 同位素流量过程线分割误差对同位素信息确定汇流模型参数结果有一定影响。

#### 参考文献 (References)

- [1] 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 Weizu. Experimental research on catchment runoff responses traced by environmental isotopes. *Advances in Water Science*, 1992, 3(4): 246-254. (in Chinese)
- [2] 顾慰祖. 论流量过程线划分的环境同位素方法[J]. 水科学进展, 1996, 7(2): 105-111.  
GU Weizu. On the hydrograph separation traced by environmental isotopes. *Advances in Water Science*, 1996, 7(2): 105-111. (in Chinese)
- [3] 包为民, 张小琴, 付森彪, 等. 流量过程多水源分割方法探讨[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 49-51.  
BAO Weimin, ZHANG Xiaoqin, FU Senbiao, et al. Study of multiple components by hydrograph separation method. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(4): 49-51. (in Chinese)
- [4] WANG T., BAO W.-M. and HU H.-Y. Isotopic variations of direct runoff. *IAHS Publication*, 2009, 331: 342-347.
- [5] MOORE, R. D. Tracing runoff sources with deuterium and oxygen-18 during spring melt in a headwater catchment, southern Laurentians, Quebec. *Journal of Hydrology*, 1989, 112(1-2): 135-148.
- [6] SKLASH, M. G. Environmental isotope studies of storm and snowmelt runoff generation. In: Anderson, M. G., Burt, T. P., Eds., *Process Studies in Hillslope Hydrology*, Chichester: Wiley, 1990: 401-435.
- [7] 王涛, 包为民, 李璐, 等. 土壤-水混合实验同位素变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 104-107.  
WANG Tao, BAO Weimin, LI Lu, et al. Isotopic variations of soil and input water mixing. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 104-107. (in Chinese)
- [8] 胡海英. 蒸发分馏和径流汇集同位素实验研究[D]. 河海大学, 2009.  
HU Haiying. Experimental study on evaporation fractionation and isotope-based runoff concentration. Hohai University, 2009. (in Chinese)