

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200093

# 流域示踪水文模型研究综述

张志才<sup>1,2</sup>, 陈喜<sup>3</sup>, 程勤波<sup>2</sup>, 吴夏懿<sup>4</sup>, Chris Soulsby<sup>5</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. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 3. 天津大学表层地球系统科学研究院, 天津 300072;

4. 江苏地质调查研究院, 江苏南京 210018; 5. 阿伯丁大学, 英国阿伯丁 AB24 3UF)

**摘要:**流域示踪水文模型是水文模型发展重要分支, 通过示踪剂迁移与水分运动的耦合计算, 深化对水流路径、水分来源及水龄分布等流域水文过程与水文功能的认识, 实现气象条件与流域特征对产汇流过程及溶质运移控制作用的精准刻画。同时, 示踪剂信息的耦合也为传统水文模型不确定性研究提供了新思路。针对这一水文学研究发展中的新领域, 目前存在诸多挑战与机遇, 迫切需要新理论与新方法及相关实践。论文系统梳理了流域示踪水文模型的研究进展, 详细论述了建模类型及适用性、示踪剂与水分(水流)的耦合计算方法, 以及针对特殊气候、地貌区的示踪水文模型, 总结了示踪水文模型面临的挑战与发展方向, 为深入开展相关研究提供参考借鉴。

**关键词:** 示踪水文模型; 示踪剂; 耦合计算; 氢氧同位素

**中图分类号:** TV11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0852(2020)06-0001-09

水文模型是模拟分析流域水文过程的重要手段, 然而在复杂的流域系统中, 只针对水分运动的传统水文模型对水文过程的解析往往具有多解性<sup>[1]</sup>, 使其模拟与预测结果具有极大不确定性, 造成对水文过程机理认识的偏差。同时, 传统水文模型在揭示不同介质中水流传输时间(指水分子进入流域至其流出流域出口所用时间)、水文连通性等流域水文功能方面也存在不足。近年来, 在水文模型中耦合示踪剂信息的示踪水文模型(Tracer-aided hydrological model)得到快速发展<sup>[2-3]</sup>。该模型方法为水文过程解析的准确性与模型预测精度提供了新的研究思路, 也为追踪流域内水流路径、评价水分滞留时间等流域水文功能提供了新思路<sup>[4-5]</sup>。同时, 通过假设各种降雨或降雪水分输入及与之伴随的溶质浓度情景, 利用耦合水文过程与示踪剂信息的示踪水文模型进行数值试验, 为流域径流、蓄量以及运移时间动态解析的理论发展提供了有力支持<sup>[6-7]</sup>。

示踪水文模型是在针对蒸散发、入渗和径流等水

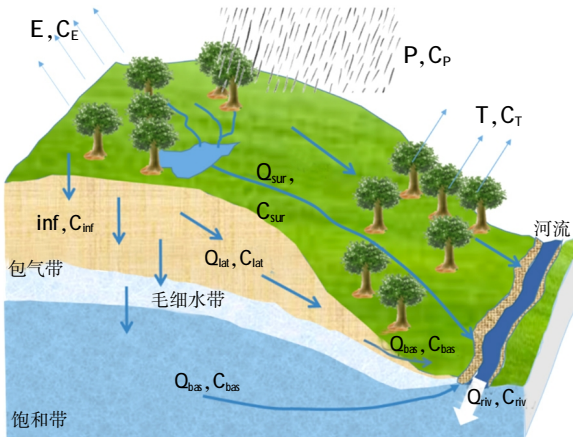
文过程的传统水文模型中融合示踪剂信息, 实现水文过程与示踪剂过程的耦合计算的新型水文模型(见图1)。其不仅深化了对流域水文过程的认知, 也提高了原有水文模型在水流路径、水龄分布等流域水文功能模拟方面的能力<sup>[8-10]</sup>。与水文模型类似, 流域示踪水文模型主要分为两种: 概念性模型和物理过程模型。从反映水流与示踪剂运移过程的空间变化能力方面, 流域示踪水文模型又可以分为集总式模型和分布式模型。概念性模型以集总式模型居多, 物理过程模型大多是分布式模型。由于水分示踪剂受气候变化、水文条件、水文地质特征、生态环境等多种因素影响, 目前示踪水文模型较多应用于小尺度或中尺度流域(小于100km<sup>2</sup>), 以去除气候、地貌类型差异引起的示踪剂区域效应<sup>[11-12]</sup>。随着观测技术与分析方法的发展, 基于不同示踪剂的示踪水文模型开始在更大尺度的流域上应用<sup>[13]</sup>。

用于示踪水文模型的示踪剂一般采用在研究时间尺度内的保守示踪剂, 即可忽略其生物地球化学过

收稿日期: 2020-04-05

基金项目: 国家自然科学基金国际合作重大项目(41571130071); 国家自然科学基金面上项目(41971028); 国家重点研发项目(2016YFC0502602)

作者简介: 张志才(1980-), 男, 河北邯郸人, 副教授, 主要研究方向为喀斯特流域水文和示踪水文。E-mail: zhangzhicai\_0@hhu.edu.cn



注: P, E, T 分别为降雨、蒸发与散失; Inf 为入渗; Qsur, Qlat, Qbas, Qriv 分别为坡面流、侧向流、基流、回归流与河道径流; C 为各水文过程中对应的示踪剂浓度。

图1 流域水文-示踪剂过程示意图

Fig.1 Conceptual diagram for hydrological and tracer processes in catchment

程,主要分为两类:人工示踪剂与天然示踪剂(均属于环境示踪剂)<sup>[14]</sup>。人工示踪剂是一种常见的示踪剂,如色素、荧光粉、溴离子等。由于人工示踪剂可根据研究方案自由投放,具有针对性强、容易回收检测,及指示性强等优点,因此常用于小尺度的水文试验(如连通试验等)。然而,由于其无法长时间连续性投放,且多为点状投放,因此较难用于流域尺度的水文模型。天然示踪剂是自然就存在于环境当中的示踪剂,如水化学离子、分子(如氯化物、碱度、二氧化硅)、稳定同位素(如<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H)等,是目前被选用在流域尺度上进行示踪水文研究的主要示踪剂。氢氧同位素(<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H)是水文示踪研究中的重要工具,其显著的分馏过程及与气候、蒸发、水岩作用等因素的密切关系,使其与其它示踪剂相比更具“指纹”效应,可为不同水分来源以及混合过程提供相应的状态信息<sup>[15]</sup>,已被广泛应用于流域水文过程<sup>[16]</sup>,水龄分布、水文连通性等流域水文功能研究<sup>[17]</sup>。同时,氢氧同位素相对于采样、测试成本低廉,加之其广泛存在于自然界,因此被作为最常用的示踪剂应用于示踪水文模型<sup>[18-19]</sup>。由于氢氧同位素随降雨、降雪进入流域,且具有显著的季节变动规律,当取样观测步长较大时,同位素浓度变化的季节因素将掩盖其蒸发、水分来源等因素。因此,氢氧同位素采样时间分辨率对分析结果具有显著影响<sup>[20]</sup>。

目前,针对流域示踪水文模型构建及应用已成为国际水文学研究的热点,其对流域水分-溶质动态耦合模拟、水龄分布、水流路径及其时空变化特征等水文相关研究具有重要意义。

## 1 概念性示踪水文模型

概念性模型是目前发展较为成熟的流域示踪水文模型类型。基于流域输入-输出响应关系的集总式模型与水箱式模型是概念性示踪水文模型的两种主要形式,由于前者对水文与示踪剂过程空间分布描述不足,因此箱式计算模式是目前应用最为广泛的概念性建模方式。根据流域内不同地貌单元或水文地质结构分层特征,采用多水箱(库)串或并联计算模式,通过水流与溶质耦合平衡计算,模拟分析各水箱水分与溶质通量、蓄量、浓度及其各要素之间的相互关系,进而解析流域运移时间、水文连通性等要素的时空分布与变异特征<sup>[21]</sup>。虽然概念性示踪水文模型可以反映概化单元(如地貌单元或水文响应单元)水分与示踪剂的动态变化,但难以对其实际物理过程及其空间变异进行刻画。

水箱式概念性水文示踪模型核心思想是将示踪剂浓度作为状态变量引入水文模型。在各概化单元(水箱)中,示踪剂运动受水流运动控制,通过联立水分平衡方程与示踪剂质量平衡方程,实现水流与示踪剂耦合模拟:

$$\frac{d(CS)}{dt} = \sum_j I_j C_{i,j} - \sum_k O_k C_{o,k} \quad (1)$$

式中: C 为示踪剂浓度; S 为水箱蓄水量; I 与 O 分别为流入和流出水分(流); j 为流入水箱的水源类型(如降雨、旁侧入流等); k 为流出水箱的水源类型(如蒸发、侧向流等)。

该类模型通过模拟计算不同单元内示踪剂浓度动态,结合不同端元的示踪剂浓度特征,分析各单元水分流入、流出路径以及混合过程,并在此基础上,实现对流域不同水文(地貌)单元之间水文连通性的刻画。该类模型适用性广泛,尤其对水源成分差异显著的流域比较适用。例如, de Grosbois 等(1988)构建的 Birkenes 模型通过将流域概化为快速与慢速响应成分水箱进行计算。与传统的水箱模型相比,该模型不仅实现对流域出口水流与示踪剂动态的耦合模拟,同时也采用流量与同位素信息共同约束模型参数,其被成功应用于高纬度流域(挪威 Birkenes 流域)<sup>[22]</sup>。 Birkel 等(2010)建立的考虑河滨带变动的 SAM 模型,将流域概化为山坡单元、河滨带单元以及地下水单元,通过对示踪剂浓度动态模拟,实现了对水流路径和来源的示踪,在此基础上计算评价不同单元对河道径流的

贡献<sup>[23]</sup>。此后,该模型经过不断发展,通过改变水箱数目、连接关系与参数,实现对不同流域单元水分与示踪剂动态的刻画。如对土壤水与地下水单元的概化,其模拟结果加深了对流域水文功能的认知,同时也使水箱模型有了部分“分布式”模型的功能<sup>[17]</sup>。应用水箱式概念模型方法构建模型的关键在于处理水文响应与示踪剂响应的时差<sup>[24]</sup>。例如,暴雨过后,流域出口流量快速上升(水文响应),但示踪剂浓度变化(示踪剂响应)与流量上升并不同步<sup>[15]</sup>。目前,主要通过增加模型参数或采用水流不完全混合计算模式处理这一差异问题<sup>[25]</sup>。然而,模型参数或混合过程计算参数的增加,对模型模拟不确定性带来新的挑战。

基于输入-输出响应关系的方法主要是在基于降雨-径流转移函数的概念性水文模型中(如单位线模型),耦合示踪剂浓度输出-输入响应转移函数(代表运移时间分布),通过卷积模型计算(见式 2),实现流域出口流量与示踪剂的耦合模拟。

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} g(t, \tau) C_{in}(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

式中:下标 out 与 in 分别为流出与进入水箱(或流域); $g$  为运移时间分布函数; $\tau$  为运移时间。

该方法的关键是根据降雨-径流(示踪剂浓度)响应确定转移函数。目前,应用较多的转移函数包含指数模型与指数活塞流模型、并连水箱模型、伽马模型等<sup>[26]</sup>。其中,指数模型适用于水流充分混合的情形,而指数活塞流模型通过增加延迟参数实现对不完全混合水流的刻画<sup>[27]</sup>。并连水箱模型适合具有明显快速流与慢速流成分的降雨-径流响应类型<sup>[28]</sup>。伽马模型适用于示踪剂浓度高峰值与缓慢消退并存的降雨-示踪剂浓度响应形态<sup>[29]</sup>。输入-输出响应关系方法计算简单,由于其对输入数据要求较低(降雨、流量及相应的示踪剂浓度信息),因此适合用于不同尺度流域运移时间、滞留时间的整体评价。然而,受集总式结构的限制,该方法难以应对水文过程的空间变化及影响因素,且该方法只适用于稳态条件,对水流过程变化剧烈的流域具有局限性。

## 2 分布式示踪水文模型

分布式水文模型克服了集总式模型对水文过程时空演变认识的不足,已成为研究流域生态水文机理,预测土地利用变化生态水文响应的重要方法和发展方向。分布式示踪水文模型主要有两种形式:一种为将流

域划分为子单元进行模拟(也称为半分布式模型)或在每个子单元内进行水箱划分,利用水量与示踪剂平衡方程,计算子单元内或子单元之间的水分与示踪剂通量。前者如 Stadnyk(2013)等建立的 isoWATFLOOD 模型<sup>[30]</sup>,其将概念性模型(响应单元)与部分水文物理过程(冰雪融化与蒸发)有效结合,使模型的物理含义更明确;同时,以响应单元为计算单元,降低了模型输入与计算的复杂性,为大尺度流域(大于 1 000 km<sup>2</sup>)水文与示踪剂耦合模拟提供了有利条件。每个子单元内进行水箱划分的建模方式(如 van Huijgevoort(2016)等建立的 STARR 模型<sup>[21]</sup>)保留了概念模型的计算效率优势,同时增强了对水文过程空间分布特征的刻画能力,对空间异质性相对较弱的流域尤为适用。这一类分布式模型总体仍属于概念性的分布式示踪水文模型,计算虽然相对简单,但其主要针对降雨入渗、侧向流、地下径流以及河道径流进行模拟计算,而对流域内能量变化的水文响应(如冻土、融雪等),以及植被水文效应(如蒸腾)描述不足。

另一种分布式示踪水文模型是基于物理过程的模型结构,如在生态水文模型中耦合示踪剂信息所构建的分布式示踪水文模型,不仅可以考虑流域各种水流过程,也可以刻画植物生理、生态过程的水文、示踪剂响应。例如, Kuppel 等(2018)构建的 EcH<sub>2</sub>O-iso 模型,通过耦合能量-水文-示踪剂过程,实现了降雨入渗、蒸散发、地表地下径流等水文全过程的分布式耦合模拟,并成功应用于苏格兰 BB 流域<sup>[4]</sup>。该类模型对流域生态水文过程刻画清晰,且在模型结构上具有较好的扩充性,便于增加各种水文过程的模拟计算。但此类模型结构复杂,参数较多,同时对输入数据(尤其是示踪剂观测数据)要求较高。

构建基于物理过程的分布式示踪水文模型,关键在于如何实现示踪剂信息与降雨入渗、蒸散发、坡面、壤中流、地下径流以及河道径流等水文全过程的耦合计算。目前,针对水流与示踪剂耦合计算主要采用如下方法。

### 2.1 降雨入渗过程与壤中、地下流过程

水(分)流-示踪剂耦合计算主要有两种方式:(1)以均衡方程为基础的均衡法;(2)以水流(分)运动的 Richards 方程与示踪剂运移的对流-弥散方程为基础的数值方法<sup>[31]</sup>。地下饱和流过程与之类似,采用均衡法与数值法(Richards 方程更换为地下水基本微分方程)进行耦合计算<sup>[32]</sup>。其中,示踪剂数值模拟控制方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{u}C) + \nabla \cdot (\mathbf{D} \nabla C) \quad (3)$$

式中： $\mathbf{u}$  为流速； $\mathbf{D}$  为弥散系数。

数值方法描述水(分)流与示踪剂的动力学过程清晰,但其包含众多物理参数,数学计算复杂。均衡法在水均衡方程中耦合示踪剂浓度,建立示踪剂均衡方程,实现水(分)流-示踪剂过程耦合计算。均衡法计算相对简单、参数较少,适用于复杂条件下流域水文过程模拟。

## 2.2 蒸散发过程

包含植被截留蒸发,土面蒸发与植被散发(蒸腾)过程。示踪剂与水分耦合计算通过以水量平衡方程与示踪剂质量平衡方程联立实现。以氢氧同位素为示踪剂的示踪水文模型,除考虑水量-同位素质量平衡外,还需考虑同位素分馏过程<sup>[33]</sup>,其可通过 Craig-Gordon 方法实现:

$$\delta_{\text{soil}}^{+\Delta 1} = \delta^* - (\delta^* - \delta_{\text{soil}}^i) f^m \quad (4)$$

式中： $\delta_{\text{soil}}$  为土壤中同位素(氢或氧)相对浓度； $\delta^*$  为当地大气条件下土壤同位素相对浓度的限定值； $f$  为蒸发后土壤水剩余比例； $m$  为同位素富集趋势的系数。

传统水文方法中,基于 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散发,再通过率定模型参数计算实际蒸散发,具有较强的“异参同效”性。耦合计算模式在水文学方法基础上增加示踪剂的混合与运移、同位素分馏等物理过程计算,不仅使蒸散发计算物理意义更加清晰,也对部分模型参数起到了约束作用。例如,植被散发的水分来源,由传统水文方法中的参数率定,转变为耦合方法中的根据示踪剂端元混合计算确定<sup>[34]</sup>。

## 2.3 河道径流过程

水流-示踪剂耦合计算方法主要包含水动力学方法与水量平衡方法。水动力学方法主要通过耦合水流圣维南方程与示踪剂对流-弥散方程实现<sup>[35]</sup>:

$$\frac{\partial C_{\text{riv}}}{\partial t} = -\frac{Q}{A_{\text{riv}}} \frac{\partial C_{\text{riv}}}{\partial x} + \frac{1}{A_{\text{riv}}} \frac{\partial}{\partial x} (A_{\text{riv}} D \frac{\partial C_{\text{riv}}}{\partial x}) + \frac{q_l}{A_{\text{riv}}} (C_l - C_{\text{riv}}) \quad (5)$$

式中： $C_{\text{riv}}$  与  $C_l$  分别为河道内与旁侧入流的示踪剂浓度； $Q$  为河道流量； $A_{\text{riv}}$  为河道截面面积； $q_l$  示旁侧入流流量。

动力学方法虽然物理过程清晰,但其计算复杂,尤其需要较多河道几何与水流形态参数,实际流域中,以上参数难以获得。水量平衡方法也是计算河道径流与示踪剂运移的重要方法,如通过耦合水流槽蓄方程与

示踪剂均衡方程进行计算<sup>[36]</sup>。相对动力学方法,水量平衡法更适合较大流域或水系较发育流域的河道径流与示踪剂演算。

## 3 针对特殊地貌区的示踪水文模型

### 3.1 针对寒区冰雪、冻土流域

高纬度、高海拔等寒冷地区,降雪、冻土等因素对流域水文过程具有重要影响。受消融期下垫面冰雪、冻土消融过程影响,径流水分来源不仅有降雨输入,也包含冰雪融水。而传统水文模型难以对水分来源及其时空变异特征进行准确模拟与验证。地处寒区的流域,下垫面冰雪或冻土层的形成过程,往往伴随着不同场次降雨或降雪,水分中所含溶质的浓度存在较大差异,形成具有层状差异的示踪剂浓度分布特征<sup>[37]</sup>。因此,融合指纹效应的示踪剂的示踪水文模型对冰冻区流域水文过程与流域水文功能研究就有显著的优势。构建寒区示踪水文模型的关键是如何实现冰雪、冻土层冻结与消融过程中示踪剂动态过程模拟。因此,分布式结构在寒区冰雪、冻土流域水文与示踪剂耦合建模中具有突出优势。例如,Ala-aho 等(2017)以氢氧同位素为示踪剂,在概念性分布式示踪水文模型 STARR 基础上,增加了考虑融雪与升华引起的氢氧同位素分馏的冰雪模块计算其水文与示踪剂过程,并在美国、瑞典与苏格兰三个高纬度流域进行了模型应用<sup>[9]</sup>。受概念性过程计算的限制,此类模型多考虑冰雪冻融对河川径流的影响。Smith 等(2019)在资料丰富的瑞典 Krycklan 流域,采用基于物理过程的分布式水文示踪模型  $\text{Ech}_2\text{O-iso}$  对寒区冰雪流域进行了水文与示踪剂动态的耦合模拟。模型较好模拟了冰雪冻融对河川径流、氢氧同位素以及土壤含水率季节变化的影响,同时刻画了土壤冻结深度及其空间变化特征<sup>[38]</sup>,成功尝试了在冰冻区应用基于物理过程的分布式示踪水文模型。

冰雪、冻土层示踪剂过程的计算总体可划分为基于经验公式与基于过程的方法。基于经验关系的计算方法以温度、降雨、雪量等气象因素年内变化为基础,分析确定不同时间内冰雪、冻土层累积与消融速率,并建立示踪剂浓度与温度或蒸发量的经验关系,进而实现冰雪、冻土示踪剂与水流的耦合计算。该方法计算简单,且对示踪剂采样观测要求相对较低,尤其对冰冻期采样困难的流域具有优势<sup>[39]</sup>。然而,该方法对冰雪、冻土层同位素物理过程考虑不足,对连续干旱或

气温异常等气象极端事件无法描述。与之对应,基于过程的方法物理明确,计算精度高,对冰冻区水源的时空变化特征刻画相对准确<sup>[40]</sup>。随着观测与采样技术的提高,该方法已经成为冰冻区示踪剂-水文耦合建模的重要发展方向。

### 3.2 针对喀斯特流域

空间异质性与多重水流并存是喀斯特流域水文地质结构与水流过程最显著的特征。目前,应用示踪剂信息分析计算喀斯特水文过程的相关研究多针对含水层而非流域,其根据由基质与管道介质组成的喀斯特含水层水流过程,联立示踪剂对流-扩散方程与地下水基本微分方程,构建地下水-溶质耦合数值模型。Cholet等(2017)通过耦合改进的扩散波模型与对流-扩散方程,实现了对洪水过程中喀斯特管道网络水流与溶质的耦合模拟,并应用于法国 Fourbanne 地区喀斯特系统<sup>[41]</sup>。然而,该类水动力学模型除计算复杂外,其只针对地下水的计算难以全面刻画独特的喀斯特流域水文全过程,如地表-地下两套汇流系统及其相互转化、落水洞等岩溶地貌的水文功能等,更无法模拟计算植被耗水,以及对土壤与裂隙水再分配的影响。针对喀斯特流域的示踪水文模型发展较晚,目前主要以集总式的概念性模型为主。Zhang等(2019)以中国南方典型喀斯特流域-陈旗小流域为研究对象,采用概念性水箱模型成功实现了流域尺度上的水流与示踪剂耦合模拟<sup>[42-43]</sup>。模型根据流域不同地貌特征划分相应的地貌单元及反应不同导水介质的快速流与慢速流水库,耦合水量平衡与示踪剂平衡计算。在模拟计算各地貌单元水分与示踪剂蓄量动态、水龄分布基础上,分析山坡-洼地地貌单元间、“快速流”与“慢速流”系统间水文连通性的时空演变,落水洞、漏斗等岩溶地貌对地表、地下系统水流的连接作用<sup>[43]</sup>。

以氢氧同位素作为示踪剂,构建基于物理过程的分布式示踪水文模型关键在于示踪剂与多重水流的耦合计算,以及不同水源同位素的分馏计算。非喀斯特地区同位素分馏主要发生在地表水体(如湖泊)与土壤水中,然而,喀斯特地区土壤层浅薄,裂隙水同位素分馏也是水分同位素富集的重要因素<sup>[34]</sup>。因此,简单的经验关系法难以对喀斯特流域水分同位素的分馏过程准确刻画,需要建立基于同位素分馏物理过程的动力学方法,但目前这方面的报道相对较少。由于喀斯特流域不同空间结构中水流及其同位素过程差异显著,且分馏、混合过程也各不相同<sup>[44]</sup>,加之针对流域氢氧同位素过

程的研究多以流域出口采样为主,空间代表性较低,这些因素都限制了基于物理过程的分布式示踪水文模型在该地区的发展。因此,明晰水文-氢氧同位素观测的时空代表性,揭示土壤、岩石裂隙-植被-大气连续体水(分)流与示踪剂运动特征,构建针对复杂水文地质结构的示踪剂与水文全过程耦合计算方法,是未来喀斯特流域示踪水文模型的发展趋势。

## 4 流域示踪水文模型面临的挑战

### 4.1 不确定性问题

不确定性是发展水文模型面临的一个突出问题。水文过程模拟的不确定性主要来源于输入(如气象观测的数据)、模型结构、目标方程设置和优化方法以及校验数据等方面的不确定性<sup>[45-46]</sup>。因此,准确诊断不确定性的来源是评估并有效降低模型不确定性的基础。由于示踪剂信息的引入,模型输入、结构、参数均发生变化,原有水文模型不确定性及其来源势必发生变化。示踪剂观测信息可以作为模型模拟目标对模型参数进行约束,增加模型结果的可信度。同时,根据示踪剂与水流耦合计算所得水流路径与水龄分布等分析结果也为模型结果的可靠性、合理性提供间接验证。然而,示踪剂信息的耦合也会给模型增加新的不确定性来源,例如由示踪剂观测信息的时空代表性带来的模型输入不确定性;水分混合模式与同位素分馏计算模式带来的模型结构不确定性;由示踪剂过程计算引入新的模型参数所引入的参数不确定性;以及由多目标函数选取主观性带来的模型计算结果的不确定性。目前已有研究对耦合示踪剂信息对流域水文模型不确定性的影响仍存在争议<sup>[33,42,47]</sup>。

因此,不确定性问题是发展流域示踪水文模型的重要研究内容和挑战。未来该方面的研究的发展方向在于:(1)如何基于流量、水位、土壤含水率等水文要素及相应示踪剂等多源观测信息构建不同模拟目标函数,分析模型参数灵敏性及受观测信息的约束特征;(2)对比分析不同目标函数下模型参数不确定性及其差异,研究目标函数对流量、示踪剂、水流成分、水龄等要素模拟不确定性的影响;(3)结合降雨与示踪剂输入的时空分布特征,分析输入对模型不确定性的影响;(4)对比分析不同耦合计算模式对模型结构不确定性的影响。通过揭示示踪剂信息的引入对模型不确定性及其来源的影响规律,研究基于多源时空信息的流域水文过程模拟不确定性降低方法。

## 4.2 水文响应速度与示踪剂响应速度问题

自然流域中,水文响应速率与示踪剂响应速率往往不同步,且受多种因素影响。区分不同植被、土壤、地质组合单元中水文响应速率与示踪剂响应速率差异,是耦合计算水(分)流-示踪剂过程的关键问题之一<sup>[15]</sup>。目前主要通过“新”水(事件水 event water)与“老”水(事前水 pre-event water)<sup>[48]</sup>不完全混合计算模式解决这一问题。水分与示踪剂运移过程中,“新”水和“老”水的水量相加引起水(分)流响应,而“新”水和“老”水中示踪剂混合(相加)引起示踪剂响应。当计算时段内“新”水与“老”水不完全混合时,即部分“新”水与“老”水混合,则出现水分响应和示踪剂响应的速率差异。该混合计算方式在考虑水文响应与示踪剂响应速率差异的同时,减少了模型参数,减低了模型的不确定性。示踪剂不完全混合计算方法具有静态与动态之分<sup>[49]</sup>,前者认为“新”水与“旧”水瞬间混合,且用于混合的比例恒定不变,后者认为混合比例随蓄量等因素变化而改变<sup>[50-52]</sup>。然而,这种依靠混合模式反映水文响应与示踪剂响应差异的方法并没有直接刻画出水流与示踪剂迁移的物理过程及其影响因素,属概念性模型范畴,且其“新”“老”水混合比例及其时空变化的估算存在较高的不确定性。因此,如何揭示不同气象与下垫面条件下水文响应速率与示踪剂响应速率差异的物理机制,建立反映其物理过程的数学计算方法,是流域示踪水文模型面临的挑战之一。

## 4.3 示踪剂数据的时空分辨率问题

观测信息是水文模型概化、输入、验证及不确定性评估的基础,其时空代表性对模型研究具有至关重要的支撑作用<sup>[53]</sup>。目前,流域尺度上气象、水文观测相对成熟,而示踪剂采样与测试相对不足。示踪剂数据采集时间分辨率通常为每周或每天,此时间分辨率的示踪剂信息虽能揭示旱季或较长时间尺度上的水文动态变化过程<sup>[54]</sup>,但无法追踪水文过程在更小时间尺度上的变化<sup>[55]</sup>。此外,时间分辨率较低的数据不仅缺乏对剧烈水文变化的辨识能力,还将增加模型计算中对快速水流成分估计的不确定性<sup>[56]</sup>,这种不足在水文响应迅速的流域尤为突出。已有研究表明,提高示踪剂观测信息的时间分辨率(如采用小时步长分辨率)可有效弥补这些不足,尤其对降雨-径流响应迅速的流域<sup>[42,57]</sup>。此外,分布式模型的显著特点在于刻画流域水文过程的空间变异特征,单以流域出口观测信息作为模拟目标进行模型参数率定,不但无法发挥分布式模型的优势,同时

也会增加模型的不确定性。而目前,针对流域示踪剂过程的研究多以流域出口采样为主,空间代表性较低,难以支撑基于物理过程的分布式建模。因此,进行高时空分辨率的示踪剂连续观测是未来示踪水文模型研究的发展趋势。

## 4.4 氢氧同位素的分馏问题

以氢氧同位素作为示踪剂的流域示踪水文模型构建除具有上述难点外,其分馏过程与相应的数学描述也是模型发展所面临的重要挑战。经验关系法常被采用于氢氧同位素分馏计算,该方法通过建立分馏与蒸发量的相关关系进行分馏计算<sup>[42]</sup>。然而,该方法缺乏物理含义,无法考虑分馏作用的时空特征。近年来,基于水-气氢氧同位素物理过程的分馏计算方法开始应用于示踪水文模型<sup>[4]</sup>,其中以 Craig-Gordon 计算模式<sup>[58]</sup>及其改进方法应用最为广泛<sup>[59]</sup>。该类方法以氢氧同位素在水-气间的动力学过程为基础,结合平衡分馏与非平衡分馏(瑞利分馏)进行计算。受观测数据与计算工作量影响,目前大多基于氢氧同位素的示踪水文模型往往忽略其分馏过程,或采用简化计算方法(如经验关系法),尤其对概念性示踪水文模型,这一不足尤为突出。此外,流域氢氧同位素分馏计算主要针对地表水与土壤水<sup>[60]</sup>,或针对流域总水分同位素分馏<sup>[61]</sup>,而对如裂隙水、植物水等水分氢氧同位素分馏过程模拟相对欠缺,同时对水分氢氧同位素分馏过程的时空变异特征研究也存在不足。因此,如何进行有效的水分与大气同位素观测,甄别不同水源同位素分馏的时空差异并建立相应的动力学分馏计算方法,是发展未来流域示踪水文模型的重大挑战。

## 5 结 论

示踪剂为水(分)流提供相应的“指纹”信息,促进了水分来源、径流划分、水龄分布等研究发展,不仅完善了水文学相关理论与方法,同时为流域生态、生物地球化学过程的研究提供了科学基础。集合了示踪剂与流域水文信息的流域示踪水文模型,通过耦合示踪剂迁移与水分(流)运动计算,不仅实现了对水文与示踪剂动态过程的耦合模拟,同时也实现了对气象与流域特征对产汇流过程与溶质运移控制作用的精准刻画,其多目标模拟也为传统水文模型模拟不确定性有效降低提供了新思路。概念性与物理过程模型是流域示踪水文模型构建的两个主要建模思路。受计算难度与示踪剂观测时空分辨率影响,概念性示踪水文模型

理论与方法发展已相对成熟。然而,物理过程示踪水文模型(分布式模型)对流域水文与示踪剂物理过程刻画精确,同时随着计算方法与采样、测试技术的不断进步,其已经成为目前该领域研究的主流方向。在流域示踪水文模型快速发展的过程中,其在模型不确定性、水文响应与示踪剂响应速率、观测时空尺度等方面面临挑战,在以氢氧同位素为示踪剂的示踪水文模型中,同位素分馏过程的时空分布特征及其相应的数学表述也是该类模型的难点所在。综上所述,示踪水文模型是流域水文学中的重要前沿领域,其在发展过程中面临挑战的同时,也为完善、发展流域水文学理论与方法提供了新机遇。

#### 参考文献:

- [1] Kirchner J W. A double paradox in catchment hydrology and geochemistry [J]. *Hydrological Processes*, 2003,17(4):871-874.
- [2] Piovano T I, Tetzlaff D, Ala-Aho P, et al. Testing a spatially distributed tracer-aided runoff model in a snow-influenced catchment: Effects of multicriteria calibration on streamwater ages [J]. *Hydrological Processes*, 2018,32(20):3089-3107.
- [3] Birkel C, Soulsby C. Advancing tracer-aided rainfall-runoff modelling: A review of progress, problems and unrealised potential [J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(25):5227-5240.
- [4] Kuppel S, Tetzlaff D, Maneta M P, et al.  $\text{ECh}_2\text{O}$ -iso 1.0: Water isotopes and age tracking in a process-based, distributed ecohydrological model [J]. *Geoscientific Model Development*, 2018,11(7):3045-3069.
- [5] Ala-Aho P, Tetzlaff D, Mcnamara J P, et al. Using isotopes to constrain water flux and age estimates in snow-influenced catchments using the STARR (Spatially distributed Tracer-Aided Rainfall-Runoff) model [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017,21(10):5089-5110.
- [6] Kirchner J W. Aggregation in environmental systems -Part 2: Catchment mean transit times and young water fractions under hydrologic nonstationarity [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016,20(1):299-328.
- [7] Kirchner, J W. Quantifying new water fractions and transit time distributions using ensemble hydrograph separation: theory and benchmark tests [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019,23(1):303-349.
- [8] Birkel C, Soulsby C, Tetzlaff D. Modelling catchment-scale water storage dynamics: reconciling dynamic storage with tracer-inferred passive storage [J]. *Hydrological Processes*, 2011,25(25):3924-3936.
- [9] Remondi F, Kirchner J W, Burlando P, et al. Water flux tracking with a distributed hydrological model to quantify controls on the spatio-temporal variability of transit time distributions [J]. *Water Resources Research*, 2018,54:3081-3099.
- [10] Cook P G, Rodellas V, Stieglitz T C. Quantifying surface water, porewater, and groundwater interactions using tracers: Tracer fluxes, water fluxes, and end-member concentrations [J]. *Water Resources Research*, 2018,54:2452-2465.
- [11] Capell R, Tetzlaff D, Soulsby C. Can time domain and source area tracers reduce uncertainty in rainfall-runoff models in larger heterogeneous catchments [J]. *Water Resources Research*, 2012,48(9):1-19.
- [12] Kelleher C, Ward A, Knapp J L A, et al. Exploring tracer information and model framework trade-offs to improve estimation of stream transient storage processes [J]. *Water Resources Research*, 2019,55:3481-3501.
- [13] Delavau C J, Stadnyk T, Holmes T. Examining the impacts of precipitation isotope input  $\delta^{18}\text{O}$  on distributed, tracer-aided hydrological modelling [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017,21(5):2595-2614.
- [14] Tetzlaff D, Buttle J, Carey S K, et al. Tracer-based assessment of flow paths, storage and runoff generation in northern catchments: A review [J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(16):3475-3490.
- [15] McDonnell J J, Beven K. Debates -The future of hydrological sciences: A (common) path forward A call to action aimed at understanding velocities, celerities and residence time distributions of the headwater hydrograph [J]. *Water Resources Research*, 2014.
- [16] Song X, Liu X, Xia J, et al. A study of interaction between surface water and groundwater using environmental isotope in Huaisha River basin [J]. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 2006,49(12):1299-1310.
- [17] Soulsby C, Birkel C, Geris J, et al. Stream water age distributions controlled by storage dynamics and nonlinear hydrologic connectivity: Modeling with high-resolution isotope data [J]. *Water Resources Research*, 2015,51(9):7759-7776.
- [18] Smith A, Welch C, Stadnyk T. Assessment of a lumped coupled flow-isotope model in data scarce Boreal catchments [J]. *Hydrological Processes*, 2016,30(21):3871-3884.
- [19] Dehaspe J, Birkel C, Tetzlaff D, et al. Spatially distributed tracer-aided modelling to explore water and isotope transport, storage and mixing in a pristine, humid tropical catchment [J]. *Hydrological Processes*, 2018,32(21):3206-3224.
- [20] Birkel C, Soulsby C, Tetzlaff D, et al. High frequency storm event isotope sampling reveals time variant transit time distributions and influence of diurnal cycles [J]. *Hydrology Processes*, 2012,26(2):308-316.
- [21] Van Huijgevoort M H J, Tetzlaff D, Sutanudjaja E H, et al. Using high resolution tracer data to constrain water storage, flux and age estimates in a spatially distributed rainfall-runoff model [J]. *Hydrological Processes*, 2016,30(25):4761-4778.
- [22] De Grosbois E, Hooper R P, Christophersen N. A multisignal automatic calibration methodology for hydrochemical models: A case study of the Birkenes Model [J]. *Water Resources Research*, 1988,24(8):1299-1307.

- [23] Birkel C, Tetzlaff D, Dunn S M, et al. Towards a simple dynamic process conceptualization in rainfall-runoff models using multi-criteria calibration and tracers in temperate, upland catchments [J]. *Hydrological Processes*, 2009,24:260-275.
- [24] Hrachowitz M, Benettin P, Van Breukelen B M, et al. Transit times—the link between hydrology and water quality at the catchment scale [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2016,3(5): 629-657.
- [25] Tetzlaff D, Birkel C, Dick J, et al. Storage dynamics in hydrope-dological units control hillslope connectivity, runoff generation, and the evolution of catchment transit time distributions [J]. *Water Resources Research*, 2014,50(2):969-985.
- [26] McGuire K J, McDonnell J J, Weiler M, et al. The role of topog-raphy on catchment-scale water residence time [J]. *Water Re-sources Research*, 2005,41(5):1-14.
- [27] Maloszewski P, Zuber A. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. 1. Models and their applicability [J]. *Journal of Hydrology*, 1982,57: 207-231.
- [28] Weiler M, Mcglynn B L, McGuire K J, et al. How does rainfall become runoff ? A combined tracer and runoff transfer function approach [J]. *Water Resources Research*, 2003,39,1315-1328.
- [29] Kirchner J W, Feng X, Neal C. Catchment-scale advection and dispersion as a mechanism for fractal scaling in stream tracer concentrations [J]. *Journal of Hydrology*, 2001,254:82-101.
- [30] Stadnyk T A, Delavau C, Kouwen N, et al. Towards hydrological model calibration and validation: simulation of stable water iso-topes using the isoWATFLOOD model [J]. *Hydrological Processes*, 2013,27 (25):3791-3810.
- [31] Sprenger M, Tetzlaff D, Buttle J, et al. Measuring and modeling stable isotopes of mobile and bulk soil water [J]. *Vadose Zone Journal*, 2017,17(1).
- [32] Jiang Z, Xu T, Mallants D, et al. Numerical modelling of stable isotope ( $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$ ) transport in a hydro-geothermal system: Mod- el development and implementation to the Guide Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,569: 93-105.
- [33] Sprenger M, Volkmann T H M, Blume T, et al. Estimating flow and transport parameters in the unsaturated zone with pore water stable isotopes [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015,19 (6):2617-2635.
- [34] Rong L, Chen X, Chen X, et al. Isotopic analysis of water sources of mountainous plant uptake in a karst plateau of south- west China [J]. *Hydrological Processes*, 2011,25(23):3666-3675.
- [35] Ye S, Covino T P, Sivapalan M, et al. Dissolved nutrient reten- tion dynamics in river networks: A modeling investigation of tran- sient flows and scale effects [J]. *Water Resources Research*, 2012,48(6).
- [36] Birkel C, Tetzlaff D, Dunn S M, et al. Using lumped conceptual rainfall-runoff models to simulate daily isotope variability with fractionation in a nested mesoscale catchment [J]. *Advances in Water Resources*, 2011,34(3):383-394.
- [37] Penna D, Engel M, Bertoldi G, et al. Towards a tracer-based conceptualization of meltwater dynamics and streamflow response in a glacierized catchment [J]. *Hydrology and Earth System Sci- ences*, 2017,21(1):23-41.
- [38] Smith A, Tetzlaff D, Laudon H, et al. Assessing the influence of soil freeze-thaw cycles on catchment water storage-flux-age interactions using a tracer-aided ecohydrological model [J]. *Hy- drology and Earth System Sciences*, 2019, 23(8):3319-3334.
- [39] Tetzlaff D, Carey S K, Mcnamara J P, et al. The essential value of long-term experimental data for hydrology and water manage- ment [J]. *Water Resources Research*, 2017,53:2598-2604.
- [40] Kuppel S, Tetzlaff D, Maneta M P, et al. What can we learn from multi-data calibration of a process-based ecohydrological model [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2018,101:301- 316.
- [41] Cholet C, Charlier J B, Moussa R, et al. Assessing lateral flows and solute transport during floods in a conduit-flow-dominated karst system using the inverse problem for the advection-diffusion equation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017,21 (7): 3635-3653.
- [42] Zhang Z, Chen X, Cheng Q, et al. Storage dynamics, hydrological connectivity and flux ages in a karst catchment: Conceptual mod- elling using stable isotopes [J]. *Hydrology and Earth System Sci- ences*, 2019,23(1):51-71.
- [43] Zhang Z, Chen X, Soulsby C. Catchment-scale conceptual mod- elling of water and solute transport in the dual flow system of the karst critical zone [J]. *Hydrological Processes*, 2017,31(19): 3421-3436.
- [44] Chen X, Zhang Z, Soulsby C, et al. Characterizing the heterogeneity of karst critical zone and its hydrological function: An integrated approach [J]. *Hydrological Processes*, 2018,32(19): 2932-2946.
- [45] Sun S, Bertrand-Krajewski J L. Separately accounting for uncer- tainties in rainfall and runoff: Calibration of event-based concep- tual hydrological models in small urban catchments using Bayesian method [J]. *Water Resources Research*, 2013,49(9):5381- 5394.
- [46] Reichert P, Mieleitner J. Analyzing input and structural uncertainty of nonlinear dynamic models with stochastic, time- dependent parameters [J]. *Water Resources Research*, 2009,45(10).
- [47] Kollat J B, Reed P M, Wagener T. When are multiobjective calibration trade-offs in hydrologic models meaningful [J]. *Water Resources Research*, 2012,48(3).
- [48] Segura C, James A L, Lazzati D, et al. Scaling relationships for event water contributions and transit times in small-forested catchments in Eastern Quebec [J]. *Water Resources Research*, 2012,48(7),1-21.
- [49] Hrachowitz M, Savenije H, Bogaard T A, et al. What can flux tracking teach us about water age distribution patterns and their



- temporal dynamics [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013,17(2):533-564.
- [50] Legout C, Molenat J, Aquilina L, et al. Solute transfer in the unsaturated zone-groundwater continuum of a headwater catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2007,332(3-4):427-441.
- [51] Renée Brooks J, Barnard H R, Coulombe R, et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate [J]. *Nature Geoscience*, 2010,3(2):100-104.
- [52] Klaus J, Zehe E, Elsner M, et al. Macropore flow of old water revisited: Experimental insights from a tile-drained hillslope [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013,17(1):103-118.
- [53] White J C, Smith W K. Seasonal variation in water sources of the riparian tree species *Acer Negundo* and *Betula Nigra*, southern Appalachian Foothills, USA [J]. *Botany*, 2015,93(8):519-528.
- [54] Birkel C, Soulsby C, Tetzlaff D. Conceptual modelling to assess how the interplay of hydrological connectivity, catchment storage and tracer dynamics controls nonstationary water age estimates [J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(13): 2956-2969.
- [55] Tetzlaff D, Soulsby C, Waldron S, et al. Conceptualization of runoff processes using a geographical information system and tracers in a nested mesoscale catchment [J]. *Hydrological Processes*, 2007,21(10):1289-1307.
- [56] Seeger S, Weiler M. Lumped convolution integral models revisited: on the meaningfulness of inter catchment comparisons [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2014,11(6):6753-6803.
- [57] Kronholm S C, Capel P D. Estimation of time-variable fast flow path chemical concentrations for application in tracer-based hydrograph separation analyses [J]. *Water Resources Research*, 2016,52:6881-6896.
- [58] Craig H, Gordon L I. Deuterium and Oxygen 18 Variations in the Ocean and Marine Atmosphere [C]. *Symposium on Marine Geochemistry*, 1964.
- [59] Soderberg K, Good S P, Wang L, et al. Stable isotopes of water vapor in the vadose zone: A review of measurement and modeling techniques [J]. *Vadose Zone Journal*, 2012,11(3).
- [61] Sprenger M, Leistert H, Gimbel K, et al. Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes [J]. *Reviews of Geophysics*, 2016.
- [61] Zhao M, Hu Y, Zeng C, et al. Effects of land cover on variations in stable hydrogen and oxygen isotopes in karst groundwater: A comparative study of three karst catchments in Guizhou Province, Southwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018,565:374-385.

### Catchment-Scale Tracer-Aided Hydrological Modelling: A Review

ZHANG Zhicai<sup>1,2</sup>, CHEN Xi<sup>3</sup>, CHENG Qinbo<sup>2</sup>, WU Xiayi<sup>4</sup>, SOULSBY Chris<sup>5</sup>

(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. Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

4. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China;

5. School of Geosciences, University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3UF, United Kingdom)

**Abstract:** The tracer-aided hydrological model is an important branch of hydrological model. Through the coupling calculation of tracer and water movement, it deepens the understanding of hydrological processes and hydrological functions in catchment scale, water sources and water age distribution. And it can also estimate the influences of meteorology and catchment characteristics on the hydrological process and solute transport precisely. Meanwhile, coupling tracer information also provides a new idea for estimation of the uncertainty of traditional hydrological models. In view of this new field in the development of hydrology research, there are many challenges, opportunities, and new theories, methods and related practices are urgently needed. This paper systematically combed the research progress of the tracer-aided hydrological model, and discussed in detail the selection of tracer, the type and suitability of the modeling, the coupling calculation method of tracer and water (water flow), and the model for specific climate and geomorphic area. The main challenges and development directions of the tracer-aided hydrological model were also summarized, which could provide reference for further research.

**Key words:** tracer-aided hydrological model; tracer; coupling calculation; hydrogen and oxygen isotopes