地球环境学报
JEE
Journal of Earth Environment
Vol. 13 No. 6 | Dec. 2022
DOI: 10.7515/JEE221007
专 论
REVIEW

降水产流同位素径流分割研究进展与展望【封面文章】

蔺铭益[1,2]，金 钊[1,3*]，余云龙[4]
1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室，西安 710061
2. 中国科学院大学，北京 100049
3. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心，西安 710061
4. 杭州电子科技大学 数据科学与信息计量研究院，杭州 310018

摘 要：降水产流是陆地水循环中大气降水补给地表水的重要环节。氢氧稳定同位素的指纹效应能够有效示踪径流的补给来源、路径和地理区域。同位素径流分割模型已从二元分割逐渐发展到三元乃至多元分割模型，多学科交叉也逐渐丰富了径流分割研究的方法体系。本文对同位素径流分割在降水产流中的应用进展作了总结分析，介绍了环境同位素（^{2}H 和 ^{18}O）在降水产流研究中的应用现状、存在的不确定性以及处理误差的方法和应用特点。最后对环境同位素在径流分割领域的应用前景进行了论述，提出环境同位素结合 GIS、InSAR、ERT 等地球物理方法，将进一步深化流域水文要素时空变化的研究。
关键词：环境同位素；径流分割；误差处理；地球物理方法

Research progress and prospects of isotopic hydrograph separation in rainfall-runoff generation【Cover】

LIN Mingyi[1,2], JIN Zhao[1,3*], YU Yunlong[4]
1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China
4. Academy of Data Science and Informetrics, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: ***Background, aim, and scope*** Rainfall runoff is an important part of the replenishment of surface water in the terrestrial water cycle. Over the past few decades, global patterns and rainfall extremes have been altered by climate change, which has significantly affected the regional hydrological cycle, especially rainfall-runoff events. Extreme rainfall-runoff events have become more frequent, resulting in a series of flood and landslide disasters. Separating the sources of water in extreme runoff is crucially important for understanding the mechanisms of storm runoff generation. Currently, environmental isotopes, e.g., stable isotopes of hydrogen and oxygen, are useful tools in tracing the water sources of surface runoff, while there are still many problems that should be further discussed. This paper aims to review the advancements and shortcomings of the isotopic hydrograph separation method and provide prospects and suggestions for this research field. ***Materials and***

收稿日期：2021-11-15；**录用日期：**2022-03-23；**网络出版：**2022-04-05
Received Date: 2021-11-15; **Accepted Date:** 2022-03-23; **Online first:** 2022-04-05
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项（B 类）（XDB40000000）；国家自然科学基金项目（41790444）
Foundation Item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB40000000); National Natural Science Foundation of China (41790444)
通信作者：金 钊，E-mail: jinzhao@ieecas.cn
Corresponding Author: JIN Zhao, E-mail: jinzhao@ieecas.cn

引用格式：蔺铭益，金 钊，余云龙. 2022. 降水产流同位素径流分割研究进展与展望 [J]. *地球环境学报*，13(6): 667–678.
Citation: Lin M Y, Jin Z, Yu Y L. 2022. Research progress and prospects of isotopic hydrograph separation in rainfall-runoff generation [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(6): 667–678.

methods We focused on the basic principle of hydrogen and oxygen stable isotope tracing. The deficiencies of isotope hydrograph separation of runoff sources were summarized based on theoretical advances and bibliometric methods in this study, and we explored the application prospects of environmental isotopes in runoff source separation. ***Results*** We showed that (1) the binary mixed model has difficulty reflecting the real contribution of water sources to stream runoff, especially during rainstorm processes, while the ternary mixed model can be used to effectively divide the contribution ratios of each water source. (2) Isotope fractionation is a major cause of errors in identifying the water sources of stream runoff. In large watersheds, uncertainties will significantly increase, which makes it difficult to control research errors. (3) Errors on a time scale can be handled by models such as VWA, CMW, and RunCE, but the calculation range is expanded in the VWA method, and the risk of subjective judgment errors exists in the CMW method. In contrast, the RunCE model can be used to effectively reduce the deviation of ice and snow melt at a given time scale. ***Discussion*** The theory of the binary mixed model is the basis for isotope runoff separation. Although there are many restrictive conditions, this is the beginning of introducing isotope tracer technology into the field of hydrograph separation, which lays a solid foundation for the development of isotope runoff separation. Great progress has been made using the ternary mixed model, which is based on the binary mixed model. The combination of multiple tracers has not only achieved theoretical breakthroughs but also meets the needs of dealing with complex environmental variables. It is possible to solve the problem of isotope runoff separation based on the existing theories. However, the focus of isotope runoff separation research is still on the quantification of uncertainty. The spatial variability of tracers can be accurately reflected using the Gaussian error analysis approach, yet it is challenging to assess errors driven by isotope fractionation effects. The MCMC method, based on Bayesian theory, is used to estimate the uncertainty of parameters, which is an effective means to improve the reliability of isotope runoff separation results. The errors caused by the time-history changes in precipitation and ice and snow meltwater at various stages can be rectified by using the weighted average method and the RunCE method, respectively. ***Conclusions*** It is difficult to thoroughly assess deviations in the runoff separation process using the error analysis method of isotope hydrograph separation. The precise separation of the runoff components depends on insight into the direction in which the error occurs and the effective selection of methods for quantifying uncertainty. ***Recommendations and perspectives*** The isotope tracing technique is anticipated to offer an exact analysis of the recharge relationship of water resources, while the geophysical approach is an effective way to comprehend the character of the macro hydrological distribution. Therefore, it is necessary to combine isotope runoff separation with geophysical methods such as GIS, InSAR, and ERT to effectively evaluate the hydrological cycle of a watershed. The isotope hydrograph separation of runoff source development trends will be interdisciplinary and complementary in the future.

Key words: environment isotope; runoff separation; error handling; geophysical methods

近年来，干旱、暴雨等极端气候事件在全球范围内呈现不断增加的趋势（Doulabian et al，2021）。气候变化的异常，加之人类活动的强烈干扰，使陆地水文过程受到前所未有的扰动（姜彤等，2020；Jehanzaib et al，2020）。如：全球变暖导致温度带北移，降水也随之发生变化，水循环和大气循环的活跃度增加，导致全球降水在时空分布上发生显著变化，低纬度和高纬度地区降水量增加，而中纬度地区降水量有所减少（Routson et al，2019；Wang et al，2019）。降雨的这种时空变化对区域水文循环产生显著影响，其中尤以降水产流作用最为明显，加之各种人类活动对流域下垫面的扰动，产生了一系列暴雨洪水、山体滑坡、泥石流等水土灾变事件。当前，为减少或预防灾害事件的发生，亟需深入认识降水产流（包括暴雨洪水）的发生过程和内在机制。

DOI: 10.7515/JEE221007

降水产流是指大气降水输送进入流域，直接补给径流或通过坡面流进入河道，又或是先进入地下水、土壤水或河岸带等系统，以超渗产流或蓄满产流的形式形成径流的过程。从流域水文管理而言，流域径流组成及其在时空尺度上的演化是流域生态保护和水资源管理的重要参考依据（Wang et al，2012；Mu et al，2018；Hu et al，2020），如不同年龄水的混合比例及随时间的演化对水质和水量的管理具有重要的指示意义（Jasechko et al，2016）。环境同位素作为一种指纹方法，是理解不同时空尺度水文过程的理想工具，可以有效示踪径流的来源，识别水文循环的流动路径（Buttle，1994；Klaus and McDonnell，2013）。近几十年来，环境同位素作为径流分割的有效方法得到普遍应用，大大促进了同位素在水文学中的应用发展，同时也提高了政府部门在水资源管理中的决策能力。

过去有关径流分割的传统方法以滤波法、HYSEP 法、水量平衡法、水文模型法、最小滑动法以及水文图分割法为主。在实际应用中，每种方法各具特色，例如：基于信号分析的数字滤波法将高低频信号分离，从而实现地表径流（高频信号）和基流（低频信号）的剥离，其客观性避免了人为主观因素的影响（Arnold and Allen，1999），但该方法缺乏物理机制，在实际应用中受到一定程度的局限；HYSEP 法是美国地质调查局推荐的一种用于计算基流的方法，该方法基于程序将径流分割，方法虽然简便，但缺少物理意义的支撑；水量平衡法和水文模型法的参数较多，应用过程中产生的误差较大，研究结果的准确性难以得到充分保证；最小滑动法以基本流量指数为依据进行基流量计算，该方法最早出自英国水文所（Mazvimavi et al，2004），该方法简单可行，在部分地区有所采用；水文图分割法的干扰因素较多，通过直接作图进行分析，主观误差较大，计算过程的复杂化导致无法在较大范围内得到推广使用。截至目前，各种方法在不同流域中皆有所应用，但由于原理不同、主客观因素影响以及缺乏科学论证，导致各方法在水文分割领域存在较大分歧（陈利群等，2006），如：杨蕊等（2013）利用 3 类 9 种方法对南盘江上游基流分割作了对比，发现 9 种方法的分割结果呈现出较大差异。

同位素径流分割方法具有快捷、高效、准确等优势，能有效克服传统方法在径流分割中的主观性、低效率或低灵敏度等缺点。降水进入流域后，在没有发生相态变化、混合或非平衡分馏的前提下，水稳定同位素值保持不变，基于氢氧稳定同位素的这种“保守”性，可用于定量分析降水、地下水、融雪水以及冰川等对河流的贡献比例（Ogunkoya and Jenkins，1993）。其中，坡面流与降水和融雪水易发生混合，其同位素组成接近（刘彦广，2013）；地下水、土壤水和河岸带水受降水量、降水时空分布、土壤类型以及植被类型等的影响，可能使得各分区系统（如饱和带、非饱和带以及河流等）的水同位素组成发生明显变化，进而影响径流分割的结果。此外，降水同位素随地理位置、季节变化等因素而发生改变，即大陆效应、纬度效应、季节效应和高程效应等（Clark and Fritz，2013）。对于小流域而言，降水同位素一般受温度效应的影响较大。干旱地区降水量小，动力蒸发导致非平衡分馏，表层土壤水同位素与大气降水差异较大（Kleine et al，2020）；而湿润地区降水丰富，补给量大，地下水和土壤水同位素值接近大气降水加权平均值。此外，降水通过各种渗流路径补给地下水，可降低同位素的季节性差异，使其同位素组成较为均一（Clark and Fritz，2013）。河道径流的补给源可分为降水（或融雪水）、地表蓄水、地下水和土壤水等，分别测得各水源的同位素组成和化学参数，然后通过模型、示踪剂以及必要的化学参数来示踪和计算各水源的补给量或补给比例。

基于当前全球同位素径流分割的研究进展和发展趋势（Yu et al，2021），本文对全球降水产流同位素径流分割进行了总结分析，包括同位素径流分割的方法及假设的前提条件、降水产流同位素径流分割的发展历程及实际应用、存在的缺陷及处理方法、理论发展和应用展望，以期为国内同位素径流分割及相关领域同行提供科学参考。

1　同位素径流分割的理论基础

同位素径流分割方法是指利用同位素（主要是氢氧稳定同位素）示踪水的来源，并将径流进行划分并确定各成分的比例。同位素径流分割研究在确定径流来源、解译水文过程和预防地质灾害（如水土流失和滑坡泥石流）方面具有重要意义。关于同位素流量过程线的分割方法包括三种，一是时间源划分法，二是产流机制划分法，三是

DOI: 10.7515/JEE221007

地理源划分法（瞿思敏等，2008）。其中时间源划分法相对产流机制划分法具有一定的不足，仅能提供产流事件发生时和发生之前水的比例，即适合于二水源的过程线分割；对于三水源乃至多水源的过程线分割，利用产流机制法进行分割更为合适。

若是二水源同位素示踪，则可以根据质量平衡法进行流量过程线划分：

$$Q=Q_{gw}+Q_r \tag{1}$$

$$Q\times\delta=Q_{gw}\times\delta_{gw}+Q_r\times\delta_r \tag{2}$$

式中：Q 为流量（$m^3\cdot s^{-1}$），Q_{gw} 和 Q_r 分别为地下水和降水对径流量的贡献量（$m^3\cdot s^{-1}$）；δ、δ_{gw} 以及 δ_r 分别为径流、地下水和降水的同位素千分偏差值（‰）。

事件水和事件前水可通过上式确定，但对于二水源径流分割需要满足以下前提假设条件（Sklash and Farvolden，1982）：（1）地下水和基流的同位素组成均一；（2）降水或融雪水的同位素含量时空均一，或是能够表征其变化；（3）降水与地下水或基流的同位素组成存在显著差异；（4）非饱和带的壤中流与地下水的同位素成分可视为一致，或其贡献可以忽略；（5）地表蓄水的影响可以忽略。

二水源径流分割方法中，单一同位素值即可描述事件水和事件前水的分量。由于存在较多假设条件，所以在一定程度上偏于理想状态，实际情况中，以上假设可能很难满足，所以分析结果不能完全反映真实情况。基于以上理论，根据质量和浓度平衡方程，拓展到三水源分割模型（Dewalle et al，1988），较大程度弥补了二水源分割模型的不足，方程如下：

$$Q=Q_{gw}+Q_r+Q_s \tag{3}$$

$$Q\times\delta=Q_{gw}\times\delta_{gw}+Q_r\times\delta_r+Q_s\times\delta_s \tag{4}$$

$$Q\times C=Q_{gw}\times C_{gw}+Q_r\times C_r+Q_s\times C_s \tag{5}$$

式中：Q_s 为土壤水对径流的贡献量（$m^3\cdot s^{-1}$）；δ_s 为土壤水同位素浓度（‰），C 为相应组分的辅助参数（Cl、Si、SiO_2、TDS 等）。

随着技术方法的不断进步和研究需求的增加，同位素径流分割的研究范围不断扩大，逐步发展到构建多水源混合模型精确研究流域水文循环过程（Hoeg et al，2000），探究径流来源的具体路径，为水资源分配和防止地质灾害提供科学依据，方法如下：

$$Q_t=Q_1+Q_2+Q_3+\cdots+Q_n \tag{6}$$

$$C_t\times Q_t=C_1\times Q_1+C_2\times Q_2+C_3\times Q_3+\cdots+C_n\times Q_n \tag{7}$$

式中：Q_n 为径流成分的流量（$m^3\cdot s^{-1}$），C_n 是相应组分的示踪剂浓度（‰），对于多元分割，可以借助第二种示踪剂（Rice and Hornberger，1998）或其他辅助参数（Hinton et al，1994）。

2 基于文献计量的同位素径流分割趋势分析

同位素水文分割已成为近年来的科学研究热点，在理论和技术不断探索的同时，进一步推动了该领域的快速发展。目前，同位素径流分割已成为全球备受关注的热点问题。基于文本数据挖掘的技术和方法，利用 Web of Science（WOS）数据库，从全球的角度分析了降水产流同位素径流分割研究领域的演变过程和聚焦热点，以深入了解同位素径流分割相关的水文过程。通过检索式“(isotope or isotopic) and (hydrograph separation)”检索相关文献，并将文献类型限定为文章、会议和综述，共检索到发表于 1985—2021 年的 473 篇文献符合选定标准，我国的相关文献产量（95 篇）仅次于美国（136 篇），位居世界第二。图 1 展示了 1985—2021 年全球有关同位素水文分割文献的年发表量，可分为三个阶段，即：（1）2000 年之前，文献产出量仅有 60 篇，且文献产量增速缓慢，年平均产量为 4 篇；（2）2000—2014 年，文献数量逐年增加，该期间文献产出共计 178 篇，年平均产量约为 11.87 篇，是第一阶段的 2.97 倍；（3）2014 年之后，文献产出量呈爆发式增长，共发表 235 篇文献，年平均产量约 33.57 篇，是上一阶段的 2.83 倍，目前处于快速发展阶段。

根据词频统计分析，三个阶段的关键词频率有所变化，意味着三个阶段的研究主题有所调整（图 2）。“Runoff”、“Hydrograph”、“Separation”、“Storm”及“Flow”等是第一阶段（图 2a）的研究主题，可能受限于理论与技术，径流成为该阶段的研究热点；在第二阶段（图 2b），关键词“Runoff”发生显著变化，由第一阶段的第 1 位降到第 4 位，该阶段有关径流分割研究的权重有所降低，但该阶段研究的覆盖面更广，空间尺度逐渐扩大；第三阶段（图 2c），关键词“Groundwater”从第二阶段的第 10 位上升到第 6 位，表明地下水受到更多关注，但鉴于同位素水文分割的文献总量在逐年增加，而第二阶段到第三阶段的同位素

DOI: 10.7515/JEE221007

径流分割文献产出的权重基本未发生改变，可知同位素径流分割依旧是水文学的研究热点之一，且同位素径流分割的不确定性评估和开发新方法是未来的发展趋势。

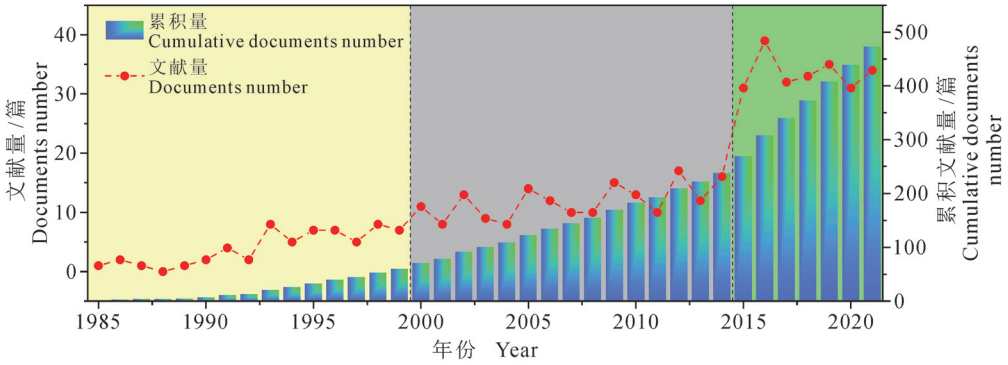

图 1　1985—2021 年水文分割的文献产出

Fig. 1　Literature output for hydrograph separation from 1985 to 2021

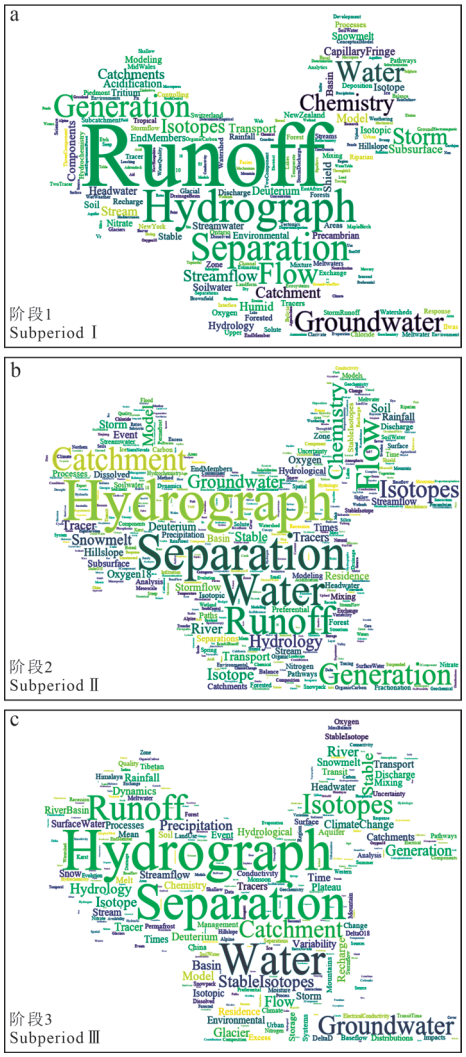

图 2　1985—2021 年水文分割文献的关键词云图

Fig. 2　Key word cloud of literature on hydrograph separation from 1985 to 2021

3　降水产流同位素径流分割研究进展

3.1　发展历程及实际应用

经过多年的理论研究和技术开发，Dinçer et al（1970）和 Martinec（1975）分别于 1970 年和 1975 年率先将稳定同位素应用于水文分割研究中。随后，Fritz et al（1976）提出单个流域基流分量的概念，并从 20 世纪 70 年代的二水源分割逐渐发展到三水源（20 世纪 80 年代）甚至目前的多水源划分阶段。随着研究的逐步深入，同位素水文分割研究逐渐暴露出诸多问题，如：二元混合模型无法解释部分暴雨径流的贡献比，老水（产流事件前的水）在暴雨径流中的占比超过 100% 等（Dewalle et al，1988）。

20 世纪 80 年代中后期，随着同位素在水文循环中的快速应用，针对各种不确定性产生的误差分析开始纳入到相关研究中（Burns，2002）。三端元混合模型也开始出现，如：Wels et al（1991）利用硅酸盐作为辅助参数，计算了第三种径流成分的贡献率；Hinton et al（1994）用 SiO_2 作为第二示踪剂，实现了三水源径流分割。但过去利用环境同位素研究水文问题千篇一律，到了 20 世纪 90 年代后期至 21 世纪初，急需寻找一种新的方法，以探索出更有价值的信息，而非简单地将径流成分进行分割。如：Harris et al（1995）提出了一种径流源建模新方法，可用于检验可变源区对径流分割的影响；Brooks et al（2010）基于氢氧稳定同位素示踪植物木质部水、地下水和地表径流

DOI: 10.7515/JEE221007

的来源，发现植物利用的水分与地表和地下水的同位素组成不同，其中地下水和地表径流同位素组成接近大气降水线（地中海气候区），并由此提出了“二水世界”理论。

当前，环境同位素虽是调查水文过程的有效工具，但对于特殊区域（如高海拔地区）仍存在较大的挑战性，例如受实地测量的限制，对融雪同位素时空变异性的认识十分有限，现有数据不足以准确量化融雪对径流的贡献（Schmieder et al，2016）。然而，通过模型和同位素水文分割的结合，可有效分析或预测流域的水文循环过程。早期模型侧重于水文分割和预测峰值流量，如传输时间模型（Małoszewski and Zuber，1982）。随着模型的进一步开发，需要校准的参数越来越多，不确定度也越来越大（Botter et al，2005）。同位素水文分割与传输时间模型的结合，能够有效反映多个时间尺度的水文响应和传输时间等实际信息（Roa-García and Weiler，2010）。Kirchner（2019）提出了集成水文分割的新方法，基于径流和一个或多个端元示踪波动之间的相关性进行水文分割，以估计在一个时间步长上端元对流量的平均贡献。该方法相比于传统水文分割法，可以准确估计端元贡献的平均值，且同位素分馏的影响较小。

近年来，国内有关降水产流同位素径流分割的研究也取得了长足发展，主要涵盖以下三方面：（1）高寒山区径流对降水或融雪水补给的响应，如：孔彦龙和庞忠和（2010）论述了高寒流域同位素径流分割的研究现状与应用前景，该领域的研究弥补了国内高寒山区同位素径流分割的短板（Kong and Pang，2012），但水文输送过程及环境条件变化对高寒山区径流过程的影响尚存在分歧，有待进一步深化研究；（2）在小流域径流分割方面，同位素径流分割方法为水资源管理和灾害防控等起到了指导性作用，将径流切分为降雨组分和降雨前土壤等系统组分（郭晓军等，2012；Gou et al，2018；谢林环等，2019；Tao et al，2021），但相关研究仅对特定的小流域有效，在大尺度空间范围内还未形成普适性；（3）在河流和地下径流方面，基于水体稳定同位素资料，判断各水体的补给关系，以便清晰认识流域内水文循环过程（张华安等，2011；潘钊等，2018）。总体而言，国内大多数研究聚焦于方法应用和结果产出，针对不确定性、误差的潜在来源以及改善途径的研究分析较少，缺乏模型方法的选择依据，并且很少对不确定性进行系统分析以校准输出结果。

3.2 缺陷及处理

水同位素在应用过程中存在较大的不确定性。虽然降水产流的研究对象一般针对小流域，但季节效应或雨量效应对水同位素的影响依然存在。此外，了解研究区或流域内的地质构造和土壤植被类型对水文过程分析至关重要，有助于从整体上认识流域的空间格局，也有助于水文分割模型的选择与建立。土壤结构在垂直剖面上有较大差异，其孔隙度一般随深度减小，且含有优势通道，如：Meinzer et al（2006）注意到同位素的示踪速度几乎比热探测器推断的树液通量速率高一个数量级，由此可推断出优先流的存在。地下水可能来源于优先通道的补给，为了有效区分新水（降水）、老水（地下水）和混合水（降水和地下水的混合）的稳定同位素组成，地下水采样的代表性需要仔细考虑。

值得注意的是，过去有关同位素水文分割数据结果精度的研究往往聚焦于计算结果的误差，用以估计同位素水文分割的不确定性，如：Rodhe（1981）和 Hooper and Shoemaker（1986）分别对相应研究的精度作了详细评估，发现水文分割的精度分别为 ±0.15 和 ±0.10。然而，模型的不确定性很少受到关注，Rodhe（1987）提出了量化双组分混合模型对输入变量敏感性的评估方法（式(8)）（Laudon and Slaymaker，1997）。再如目前依然采用较多的高斯误差分析方法（Rai et al，2021），需要大量的样本数据，以准确反映示踪剂的空间变异性；但高斯误差分析法只能估算示踪信号变化产生的不确定性，难以估算同位素分馏效应引起的不确定性。相较于高斯误差分析法，贝叶斯水文分割法具有巨大优势，由于其考虑了示踪信号之间的相关性和径流组分之间的依赖性，并基于贝叶斯理论，采用马尔科夫链蒙特卡洛（MCMC）方法估算参数的不确定性（Markovich et al，2019；He et al，2020），使得贝叶斯水文分割法的结论更具说服力。

$$|\Delta X|=\frac{1}{C_p-C_s}\times\sqrt{\Delta C_t^2+\Delta C_s^2+X^2\times(\Delta C_p^2+\Delta C_s^2)} \quad (8)$$

式中：X 为事件前水（降雨前的水）的分数，ΔX 是 X 的不确定性，ΔC_t、ΔC_s 和 ΔC_p 分别为总水、降雨和降雨前水的组分。

DOI: 10.7515/JEE221007

植被类型是造成研究误差的重要因素，其一方面通过冠层截留、根系固土以及地表阻碍的方式减缓降水垂直入渗土壤或侧向补给河川径流。因此，针对不同植被类型的流域，其降水同位素呈现出不同程度的时程效应（王轶凡等，2017），另一方面影响流域的蒸发量。Welp et al（2005）认为：如果蒸发量（E）是该流域蒸散量（ET）的主要组成部分，并且蒸发要素与河流流量密切相关，那么就不能把驱动力视为雪和雨的简单混合。不同植物群落下土壤入渗速率也存在显著差异，灌草群落（灌木和草本）土壤稳定入渗速率大于乔木（王国梁等，2003），降水进入不同流域系统具有显著的时空变化特征，在径流分割时产生较大的干扰。因此，研究流域在特定植被类型下的水分迁移方式，以确保径流成分识别的准确性，可以借助“染色”示踪剂实现这一过程，如：Blume et al（2008）利用“染色”示踪剂研究不同地块（林地和植被稀少的火山灰）规模上的差异变化，发现在夏季至冬季期间，林地的优先流变化显著，而水在裸露的火山灰地块上以水平锋面渗透。

很多研究直接忽略土壤水的影响，利用二元混合模型阐述径流分割过程线，郭晓军等（2012）在拟合霍顿公式时发现土壤细颗粒随水流运移，导致下渗率和稳定下渗率随之发生变化，这对研究结果的可信度带来更大的质疑。Hu et al（2010）通过理论研究，对忽略土壤水补给造成的不确定性进行了估计和分析，发现土壤水分在暴雨流生成中起着重要的作用。所以，在研究展开之前，有必要对土壤水和地下水同位素作详细评估分析。

同位素组成在时空尺度上呈现出较大差异。较大的集水区或集水区包含许多不同的空间结构单元时，很难结合同位素含量的空间变异性，对于大流域径流水文分割，随着空间尺度增加难度逐渐增大。大流域的地形、高程和植被类型等更为复杂多变（Dusek and Vogel，2018），降水、入渗、蒸发和截留等作用具有显著差异。王晓燕（2015）研究了黄土高原地区空间尺度对降雨产流的影响，发现坡面、小流域和中大流域的主要影响因子各不相同。针对流域的复杂程度，增加样本的覆盖密度和科学设计研究方案能够有效应对降水或融雪水在空间尺度上的变异性，如：Schmieder et al（2016）建议采用多样本（而不仅仅是地形复杂的集水区朝南或朝北斜坡上的样本）的方式应对复杂地形融雪水带来的偏差。总之，随着空间尺度的增大，影响因素增多，利用模型进行流量过程线分割时产生的不确定性逐渐增大，针对地形复杂或空间尺度较大的流域，采用高分辨率分析也不失为一种有效途径（Lone et al，2021）。因此，有关降水产流同位素径流分割的研究主要在小流域开展。而时间尺度上的差异主要来源于事件水的同位素误差和精细时间尺度上的快速反应，采用配备有扩散采样器的便携式波长扫描腔衰荡光谱仪获得高时间分辨率数据，能够有效揭示径流的快速补给现象（Tweed et al，2016），针对降水的季节性变化，往往采用加权平均法减少该类误差，加权平均值具体计算方法如下：

$$\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{e}_t}=\sum_{i=1}^{N} M_i\times\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{m}_i}\div\sum_{i=1}^{N} M_i \tag{9}$$

式中：$\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{e}}$、$\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{m}}$ 分别为计算和实测的同位素组成，M_i 为增量收集的融水深度，t 为水文分割时间步长。

除了夏季与冬季温度效应造成的氢氧稳定同位素差异外，降雪在地表暂时储存期间发生融化、冷凝、升华以及混合等过程，其同位素值会发生分馏效应，对同位素比值具有较大影响（Rozanski et al，2000）。Unnikrishna et al（2002）研究了积雪内部理化性质控制融雪水的氧同位素组成（δ^{18}O）机理，发现融雪在初期和后期的同位素组成与混合后的值存在差异，与简单混合后的 δ^{18}O 值相比分别低 1.30‰ 和高 1.45‰。各剖面日平均积雪 δ^{18}O 值从 −15.15‰ 上升到 −12.05‰，冬季未出现大量融化时富集重同位素（δ^{18}O 值高于积雪），出现大量融雪水初期则贫化重同位素（δ^{18}O 值低于积雪）。Miller et al（2021）对怀俄明州东南部的两个流域进行研究后发现：在主融雪期间，相较于积雪而言，融雪水的稳定同位素产生了很大变异，但径流的同位素组成保持高度一致性，且径流的氢氧稳定同位素组成的年际变化小于电导率，表明径流主要来源于融雪。初期融雪水的同位素值较小，但必须考虑同位素值在过程中的渐进富集现象（Hooper and Shoemaker，1986；Beria et al，2018），以确保校准径流分割模型结果的准确性（Liu et al，2004）。通过分层和分时采集融雪水，以揭示融雪水同位素的时空变异，如：Li et al（2020）增加了冰雪消融期间的采样频率，以反映冰川和雪融水对径流的真实补给情况。

对于雪水融化过程造成的偏差，先后有人提

DOI: 10.7515/JEE221007

出了校准模型，最初是利用同位素加权平均值（VWA）或同位素即时值（CMW）的方法减小误差（Liu et al，2008；Wang et al，2015），但 VWA 法在计算过程中扩大范围，计算结果包括后融化的雪，因此使用平均同位素值进行水文分割会产生误差，需要进一步量化（式(10)）同位素分馏所形成的新水的不确定度（Lee et al，2014；Jung et al，2020），而 CMW 法对融水滞留时间的设定存在较大主观判断或理想状态（孔彦龙和庞忠和，2010）。Laudon et al（2002）提出了新模型（RunCE）用以降低冰雪融水在时间尺度上出现的偏差，计算方法（式(11)）如下：

$$\Delta x_{\mathrm{r}}=-x_{\mathrm{r}}\div(C_{\mathrm{r}}-C_{\mathrm{g}})\times\Delta C_{\mathrm{r}} \tag{10}$$

$$\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{e}_t}=(\sum_{i=1}^{t}M_i\times\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{m}_i}-\sum_{i=1}^{t}E_i\times\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{e}_i})\div(\sum_{i=1}^{t}M_i-\sum_{i=1}^{t}E_i) \tag{11}$$

式中：Δx_{r} 为新水（雨水或融雪水）补给河流时的系统误差，ΔC_{r} 为误差增量，与示踪剂浓度和新水同位素变化有关。$\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{m}_i}$、$\delta^{18}\mathrm{O}_{\mathrm{e}_i}$ 分别为融雪水和事件水的同位素组成，M_i、E_i 分别为增量收集的融水深度和增量计算的事件水排放量。计算的每个时刻的值与上一时刻的计算结果密切相关，因此，须对每个时间步长进行迭代求解。

更大的问题在于各分区界面及分区内的变化影响，在分区及界面上发生各种化学物理反应，导致水同位素发生分馏，尤其在地形和地质构造复杂多样的区域，各种水源在汇集混合过程中易发生同位素分馏（Sprenger et al，2019），直接影响流量过程线分割的结果。针对这一误差判断，Pang et al（2017）总结了“十三线”图，通过图形的方式，直截了当地反映水文发生的过程反应。

4 降水产流同位素径流分割研究展望

4.1 理论发展

同位素径流分割须满足前提假设条件，不同径流成分之间明显的同位素组成差异便于流量过程线分割，因此在研究展开之前，有必要对不同径流成分做初步预实验，了解流域内地下水和降水（包括降雨和融雪水）同位素含量的时空变化特征。在二元混合模型应用中，有必要对土壤质地结构做详细分析研究，确保饱和带下的地下径流和非饱和带的壤中流同位素含量时空均一。总之，对同位素径流分割前提假设带来的误差进行处理，需要对研究区不同径流成分做前期预实验，在确定满足条件假设或能够定量表征其变化的条件下才能进行下一步的采样和实验分析研究。目前，有关各分区（如非饱和带、饱和带及河流等）之间的界面过程引起的变化研究较少，尚不能完全定量描述水同位素含量在此过程中的转变。

4.2 应用展望

同位素径流分割理论和技术经过多年的发展和优化之后，已较为成熟。从全球发展趋势来看，逐渐向大尺度、大范围和跨领域的方向推进，理论上得到大量的补缺，如水文循环与同位素分馏机理及元素放射性衰变的有机结合，在应用方面实现了水文示踪和定年，为研究径流形成变化和水文更替演化提供了强有力的理论支撑。

面对复杂多变的野外环境，单一使用同位素研究水文循环难以反映真实情况。利用 GIS 技术划分地表水流域，识别子流域分布特征，并分析研究区域的地形地貌，推测汇水范围，再结合环境同位素技术分割径流补给源（Waddington and Devito，2001；姜光辉和郭芳，2012），是未来的一个发展方向。此外，利用多时相 InSAR 技术探测区域地下水变化较为便捷，可以辅助分析流域地下水补给河流径流状态，但目前 InSAR 在流域水文循环中的应用不多，其技术和应用框架具有较大的开发空间。因此，特定环境需要利用多种方法和工具来弥补同位素的局限性，如：借助氢氧稳定同位素（δD 和 δ^{18}O）结合二氧化硅和电导率对不列颠哥伦比亚海岸山脉的径流事件过程线进行分割，发现在部分水文和岩性环境，电导率和二氧化硅浓度替代水文示踪剂具有较好的效果，前提是需要根据环境特征进行验证校准（Laudon and Slaymaker，1997）。高密度电阻率成像法（ERT）在水文地质领域早已得到广泛应用。ERT 技术基于阵列电探获得多尺度断面电阻率信息，借助电阻率—土壤含水量转换模型，通过反演软件对地下水文状况以二维或三维的“切片”形式进行可视化。然而，目前借助 ERT 技术深化径流分割的研究较为少见。Mejus et al（2021）结合 ERT 和环境同位素对马来西亚半岛的马查坝渗流问题做了详细的追踪分析，发现二者的结合能够更有效可靠地对大坝渗流问题做出评价，Redhaounia et al（2016）在岩溶含水层的调查研究中通过分析水稳定同位素以确定补给源和补给过程，再通过

DOI: 10.7515/JEE221007

电阻率层析成像法测量调查阿姆敦地区地下含水层分布情况，发现大小不一的孤立空腔，ERT 技术对地下灰岩空洞的三维探测具有较大优势。因此，多学科、跨领域和多方法结合是未来降水产流同位素径流分割研究的发展趋势，将推动流域降水产流理论的进一步完善。

参考文献

陈利群，刘昌明，李发东 . 2006. 基流研究综述 [J]. *地理科学进展*, 25(1): 1–15. [Chen L Q, Liu C M, Li F D. 2006. Reviews on base flow researches [J]. *Progress in Geography*, 25(1): 1–15.]

郭晓军，崔　鹏，朱兴华 . 2012. 泥石流多发区蒋家沟流域的下渗与产流特点 [J]. *山地学报*，30(5): 585–591. [Guo X J, Cui P, Zhu X H. 2012. Infiltration and runoff yield characteristics in Jiangjia ravine [J]. *Journal of Mountain Science*, 30(5): 585–591.]

姜光辉，郭　芳 . 2012. 利用 GIS 水化学和同位素方法判断灵水来源 [J]. *水资源保护*，28(1): 59–63. [Jiang G H, Guo F. 2012. Source identification of Lingshui Spring using GIS-based hydrochemistry and environmental isotopic methods [J]. *Water Resources Protection*, 28(1): 59–63.]

姜　彤，孙赫敏，李修仓，等 . 2020. 气候变化对水文循环的影响 [J]. *气象*, 46(3): 289–300. [Jiang T, Sun H M, Li X C, et al. 2020. Impact of climate change on water cycle [J]. *Meteorological Monthly*, 46(3): 289–300.]

孔彦龙，庞忠和 . 2010. 高寒流域同位素径流分割研究进展 [J]. *冰川冻土*，32(3): 619–625. [Kong Y L, Pang Z H. 2010. Isotope hydrograph separation in alpine catchments: a review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(3): 619–625.]

刘彦广 . 2013. 基于水化学和同位素的高寒山区雨季径流过程示踪 [D]. 武汉：中国地质大学 . [Liu Y G. 2013. Using hydrochemical and isotope tracers analying to delineate hydrologic process in cold alpine watershed in rainy season [D]. Wuhan: China University of Geosciences.]

潘　钊，孙自永，马　瑞，等 . 2018. 黑河上游高寒山区降雨 - 径流形成过程的同位素示踪 [J]. *地球科学*, 43(11): 4226–4236. [Pan Z, Sun Z Y, Ma R, et al. 2018. Isotopic investigation of rainfall-runoff generation in an alpine catchment in headwater regions of Heihe River, northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Earth Science*, 43(11): 4226–4236.]

瞿思敏，包为民，Jeffrey J. McDonnell, 等 . 2008. 同位素示踪剂在流域水文模拟中的应用 [J]. *水科学进展*, 19(4): 587–596. [Qu S M, Bao W M, McDonnell J J, et al. 2008. Isotope tracer in watershed hydrological modeling [J]. *Advances in Water Science*, 19(4): 587–596.]

王国梁，刘国彬，周生路 . 2003. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响 [J]. *自然资源学报*，18(5): 529–535. [Wang G L, Liu G B, Zhou S L. 2003. The effect of vegetation restoration on soil stable infiltration rates in small watershed of loess gully region [J]. *Journal of Natural Resources*, 18(5): 529–535.]

王晓燕 . 2015. 黄土高原不同空间尺度森林植被对径流的影响 [D]. 北京：北京林业大学 . [Wang X Y. 2015. The impact of forest on runoff under different space scale on the Loess Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University.]

谢林环，江　涛，曹英杰，等 . 2019. 城镇化流域降水径流氢氧同位素特征及洪水径流分割 [J]. *地理学报*，74(9): 1733–1744. [Xie L H, Jiang T, Cao Y J, et al. 2019. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation and runoff and flood hydrograph separation in an urbanized catchment [J]. *Acta Geographica Sinica*, 74(9): 1733–1744.]

王轶凡，瞿思敏，李代华，等 . 2017. 小流域降雨径流氢氧同位素特征分析及其对径流分割的指示意义 [J]. *河海大学学报（自然科学版）*，45(4): 365–371. [Wang Y F, Qu S M, Li D H, et al. 2017. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in rainfall-runoff in small watershed and their implications for runoff separation [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 45(4): 365–371.]

杨　蕊，王　龙，韩春玲 . 2013. 9 种基流分割方法在南盘江上游的应用对比 [J]. *云南农业大学学报（自然科学）*，28(5): 707–712. [Yang R, Wang L, Han C L. 2013. Nine kinds of base flow separation methods apply and comparative in the upper reach of Nanpan River [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 28(5): 707–712.]

张华安，王乃昂，李卓仑，等 . 2011. 巴丹吉林沙漠东南部湖泊和地下水的氢氧同位素特征 [J]. *中国沙漠*, 31(6): 1623–1629. [Zhang H A, Wang N A, Li Z L, et al. 2011. Features of hydrogen and oxygen isotopes in lakes and groundwater in southeast Badain Jaran Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 31(6): 1623–1629.]

DOI: 10.7515/JEE221007

Arnold J G, Allen P M. 1999. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2): 411–424.

Beria H, Larsen J R, Ceperley N C, et al. 2018. Understanding snow hydrological processes through the lens of stable water isotopes [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(6): e1311. DOI: 10.1002/wat2.1311.

Blume T, Zehe E, Bronstert A. 2008. Investigation of runoff generation in a pristine, poorly gauged catchment in the Chilean Andes Ⅱ: qualitative and quantitative use of tracers at three spatial scales [J]. *Hydrological Processes*, 22(18): 3676–3688.

Botter G, Bertuzzo E, Bellin A, et al. 2005. On the Lagrangian formulations of reactive solute transport in the hydrologic response [J]. *Water Resources Research*, 41(4): W04008. DOI: 10.1029/2004WR003544.

Brooks J R, Barnard H R, Coulombe R, et al. 2010. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate [J]. *Nature Geoscience*, 3(2): 100–104.

Burns D A. 2002. Stormflow-hydrograph separation based on isotopes: the thrill is gone—what's next? [J]. *Hydrological Processes*, 16(7): 1515–1517.

Buttle J M. 1994. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 18(1): 16–41.

Clark I D, Fritz P. 2013. Environmental isotopes in hydrogeology [M]. Los Angeles: CRC Press: 1–342.

Dewalle D R, Swistock B R, Sharpe W E. 1988. Three-component tracer model for stormflow on a small Appalachian forested catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 104(1/2/3/4): 301–310.

Dinçer T, Payne B R, Florkowski T, et al. 1970. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18 [J]. *Water Resources Research*, 6(1): 110–124.

Doulabian S, Golian S, Toosi A S, et al. 2021. Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 12(1): 166–184.

Dusek J, Vogel T. 2018. Hillslope hydrograph separation: the effects of variable isotopic signatures and hydrodynamic mixing in macroporous soil [J]. *Journal of Hydrology*, 563: 446–459.

Fritz P, Cherry J A, Weyer K U, et al. 1976. Storm runoff analysis using environmental isotopes and major ions [C]// Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. Vienna: IAEA: 111–130.

Gou J F, Qu S M, Shi P, et al. 2018. Application of stable isotope tracer to study runoff generation during different types of rainfall events [J]. *Water*, 10(5): 538. DOI: 10.3390/w10050538.

Harris D M, McDonnell J J, Rodhe A. 1995. Hydrograph separation using continuous open system isotope mixing [J]. *Water Resources Research*, 31(1): 157–171.

He Z H, Unger-Shayesteh K, Vorogushyn S, et al. 2020. Comparing Bayesian and traditional end-member mixing approaches for hydrograph separation in a glacierized basin [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(6): 3289–3309.

Hinton M J, Schiff S L, English M C. 1994. Examining the contributions of glacial till water to storm runoff using two- and three-component hydrograph separations [J]. *Water Resources Research*, 30(4): 983–993.

Hoeg S, Uhlenbrook S, Leibundgut C. 2000. Hydrograph separation in a mountainous catchment— combining hydrochemical and isotopic tracers [J]. *Hydrological Processes*, 14(7): 1199–1216.

Hooper R P, Shoemaker C A. 1986. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation [J]. *Water Resources Research*, 22(10): 1444–1454.

Hu H Y, Bao W M, Huang G R, et al. 2010. Uncertainty analysis of the tracer-based hydrograph separation method [C]// 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. New York: IEEE: 1–4.

Hu M P, Zhang Y F, Wu K B, et al. 2020. Assessment of streamflow components and hydrologic transit times using stable isotopes of oxygen and hydrogen in waters of a subtropical watershed in eastern China [J]. *Journal of Hydrology*, 589: 125363. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125363.

Jasechko S, Kirchner J W, Welker J M, et al. 2016. Substantial proportion of global streamflow less than three months old [J]. *Nature Geoscience*, 9(2): 126–129.

Jehanzaib M, Shah S A, Yoo J, et al. 2020. Investigating the

impacts of climate change and human activities on hydrological drought using non-stationary approaches [J]. *Journal of Hydrology*, 588: 125052. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125052.

Jung H, Koh D C, Kim Y S, et al. 2020. Stable isotopes of water and nitrate for the identification of groundwater flowpaths: a review [J]. *Water*, 12(1): 138. DOI: 10.3390/w12010138.

Kirchner J W. 2019. Quantifying new water fractions and transit time distributions using ensemble hydrograph separation: theory and benchmark tests [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1): 303–349.

Klaus J, McDonnell J J. 2013. Hydrograph separation using stable isotopes: review and evaluation [J]. *Journal of Hydrology*, 505: 47–64.

Kleine L, Tetzlaff D, Smith A, et al. 2020. Using water stable isotopes to understand evaporation, moisture stress, and re-wetting in catchment forest and grassland soils of the summer drought of 2018 [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(7): 3737–3752.

Kong Y L, Pang Z H. 2012. Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge [J]. *Journal of Hydrology*, 434/435: 121–129.

Laudon H, Hemond H F, Krouse R, et al. 2002. Oxygen 18 fractionation during snowmelt: implications for spring flood hydrograph separation [J]. *Water Resources Research*, 38(11): 1258. DOI: 10.1029/2002WR001510.

Laudon H, Slaymaker O. 1997. Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example [J]. *Journal of Hydrology*, 201(1/2/3/4): 82–101.

Lee J, Koh D C, Choo M K. 2014. Influences of fractionation of stable isotopic composition of rain and snowmelt on isotopic hydrograph separation [J]. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 35(2): 97–103.

Liu F J, Williams M W, Caine N. 2004. Source waters and flow paths in an alpine catchment, Colorado Front Range, United States [J]. *Water Resources Research*, 40(9): W09401. DOI: 10.1029/2004WR003076.

Liu Y H, Fan N J, An S Q, et al. 2008. Characteristics of water isotopes and hydrograph separation during the wet season in the Heishui River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 353(3/4): 314–321.

Li Z J, Li Z X, Song L L, et al. 2020. Hydrological and runoff formation processes based on isotope tracing during ablation period in the source regions of Yangtze River [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(8): 4169–4187.

Lone A, Jeelani G, Deshpande R D, et al. 2021. Estimating the sources of stream water in snow dominated catchments of western Himalayas [J]. *Advances in Water Resources*, 155: 103995. DOI: 10.1016/j.advwatres.2021.103995.

Małoszewski P, Zuber A. 1982. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers: 1. Models and their applicability [J]. *Journal of Hydrology*, 57(3/4): 207–231.

Markovich K H, Dahlke H E, Arumí J L, et al. 2019. Bayesian hydrograph separation in a minimally gauged alpine volcanic watershed in central Chile [J]. *Journal of Hydrology*, 575: 1288–1300.

Martinec J. 1975. Subsurface flow from snowmelt traced by tritium [J]. *Water Resources Research*, 11(3): 496–498.

Mazvimavi D, Meijerink A M J, Stein A. 2004. Prediction of base flows from basin characteristics: a case study from Zimbabwe [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4): 703–715.

Meinzer F C, Brooks J R, Domec J C, et al. 2006. Dynamics of water transport and storage in conifers studied with deuterium and heat tracing techniques [J]. *Plant, Cell & Environment*, 29(1): 105–114.

Mejus L, Asfahani J, Mohd Hashim M M, et al. 2021. Dam seepage assessment based on combined electrical resistivity tomography and environmental isotope techniques at Machap Reservoir, Malaysia [J]. *Pollution Research*, 40(3): 1–11.

Miller S A, Mercer J J, Lyon S W, et al. 2021. Stable isotopes of water and specific conductance reveal complimentary information on streamflow generation in snowmelt-dominated, seasonally arid watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 596: 126075. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126075.

Mu Y H, Ma W, Li G Y, et al. 2018. Impacts of supra-permafrost water ponding and drainage on a railway embankment in continuous permafrost zone, the interior of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 154: 23–31.

Ogunkoya O O, Jenkins A. 1993. Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph

separation model [J]. *Journal of Hydrology*, 142(1/2/3/4): 71–88.

Pang Z H, Kong Y L, Li J, et al. 2017. An isotopic geoindicator in the hydrological cycle [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17: 534–537.

Rai S P, Noble J, Singh D, et al. 2021. Spatiotemporal variability in stable isotopes of the Ganga River and factors affecting their distributions [J]. *Catena*, 204: 105360. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105360.

Redhaounia B, Ilondo B O, Gabtni H, et al. 2016. Electrical resistivity tomography (ERT) applied to karst carbonate aquifers: case study from Amdoun, northwestern Tunisia [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 173(4): 1289–1303.

Rice K C, Hornberger G M. 1998. Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contributions to peak flow in a small, forested, headwater catchment [J]. *Water Resources Research*, 34(7): 1755–1766.

Roa-García M C, Weiler M. 2010. Integrated response and transit time distributions of watersheds by combining hydrograph separation and long-term transit time modeling [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(8): 1537–1549.

Rodhe A. 1981. Spring flood meltwater or groundwater? [J]. *Nordic Hydrology*, 12(1): 21–30.

Rodhe A. 1987. The origin of streamwater traced by oxygen-18 [D]. Knivsta: Uppsala University.

Routson C C, McKay N P, Kaufman D S, et al. 2019. Mid-latitude net precipitation decreased with Arctic warming during the Holocene [J]. *Nature*, 568(7750): 83–87.

Rozanski K, Froehlich K, Mook W G, et al. 2000. Surface water [M]// Mook W G. Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization: 1–117.

Schmieder J, Hanzer F, Marke T, et al. 2016. The importance of snowmelt spatiotemporal variability for isotope-based hydrograph separation in a high-elevation catchment [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(12): 5015–5033.

Sklash M G, Farvolden R N. 1982. The use of environmental isotopes in the study of high-runoff episodes in streams [M]// Perry E C, Montgomery C W. Isotope studies of hydrologic processes. DeKalb, Illinois: Northern Illinois University Press: 65–73.

Sprenger M, Stumpp C, Weiler M, et al. 2019. The demographics of water: a review of water ages in the critical zone [J]. *Reviews of Geophysics*, 57(3): 800–834.

Tao Z, Li M, Si B C, et al. 2021. Rainfall intensity affects runoff responses in a semi-arid catchment [J]. *Hydrological Processes*, 35(4): e14100. DOI: 10.1002/hyp.14100.

Tweed S, Munksgaard N, Marc V, et al. 2016. Continuous monitoring of stream δ^{18}O and δ^{2}H and stormflow hydrograph separation using laser spectrometry in an agricultural catchment [J]. *Hydrological Processes*, 30(4): 648–660.

Unnikrishna P V, McDonnell J J, Kendall C. 2002. Isotope variations in a Sierra Nevada snowpack and their relation to meltwater [J]. *Journal of Hydrology*, 260(1/2/3/4): 38–57.

Waddington J M, Devito K J. 2001. Portable irrigation system for studying hillslope and wetland runoff generation processes [J]. *Hydrological Processes*, 15(2): 281–287.

Wang G X, Liu G S, Liu L A. 2012. Spatial scale effect on seasonal streamflows in permafrost catchments on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 26(7): 973–984.

Wang X Y, Li Z Q, Ross E, et al. 2015. Characteristics of water isotopes and hydrograph separation during the spring flood period in Yushugou River Basin, Eastern Tianshans, China [J]. *Journal of Earth System Science*, 124(1): 115–124.

Wang X X, Jiang D B, Lang X M. 2019. Extreme temperature and precipitation changes associated with four degree of global warming above pre-industrial levels [J]. *International Journal of Climatology*, 39(4): 1822–1838.

Welp L R, Randerson J T, Finlay J C, et al. 2005. A high-resolution time series of oxygen isotopes from the Kolyma River: implications for the seasonal dynamics of discharge and basin-scale water use [J]. *Geophysical Research Letters*, 32(14): L14401. DOI: 10.1029/2005GL022857.

Wels C, Cornett R J, Lazerte B D. 1991. Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers [J]. *Journal of Hydrology*, 122(1/2/3/4): 253–274.

Yu Y L, Jin Z, Qiu J P. 2021. Global isotopic hydrograph separation research history and trends: a text mining and bibliometric analysis study [J]. *Water*, 13(18): 2529. DOI: 10.3390/w13182529.