

# 稳定同位素在流域生态系统水文过程研究中的应用\*

徐庆 左海军

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

**摘要:**近几十年来, 稳定同位素技术在流域生态水文研究中的应用日益广泛。文中重点综述了氢氧稳定同位素技术在大气降水水汽来源、径流分割、流域产流方式划分、非饱和带土壤水分运移、植物水分利用、不同水体相互转化及同位素水文模型等方面研究应用的最新进展, 分析其存在的问题, 展望该技术在流域生态系统水文过程研究中的应用前景和发展方向。

**关键词:**稳定同位素, 流域生态系统, 水循环过程, 径流分割, 水文模型

中图分类号: S715-3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2020)01-0008-06

DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2019.0097.y

## Application of Stable Isotope Technology to Ecosystem of Watershed Hydrology

Xu Qing Zuo Haijun

(Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration;

Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Over recent decades, stable isotope technology has been widely applied in watershed hydrology. The paper reviews the latest research progress in the application of stable isotope techniques to precipitation water vapor source, hydrograph separation, the division of watershed runoff patterns, plant water use, soil water transport in unsaturated zone, the transformation of different water bodies, and isotopic hydrological models, and discusses the currently existing problems in the research on watershed hydrology. At the end, the application and development of the technology in watershed hydrology are prospected.

**Keywords:** stable isotope, watershed ecosystem, hydrologic cycle process, hydrograph separation, hydrological model

稳定同位素广泛存在于自然界水体中, 在流域水循环的不同水体相变过程中发生平衡分馏和动力分馏。同位素分馏效应使流域生态系统不同水体的氢氧同位素组成存在差异, 据此可判定流域各组分水分来源, 指示环境条件变化和各水体形成成因, 定量阐明地下水年龄、更新周期、补给速率、滞留时间及水循环过程和路径等, 从而为研究流域径流形成、不同水体转化关系、流域水循环过程及影响机制等提供科学支撑<sup>[1]</sup>。同传统水文学方法相比, 稳定同位素技术具有较高的准确度与灵敏度, 在流域生态水文过程研究中具有独特的优势, 已成为流域生态水文研究的重

要技术手段。稳定同位素技术在 20 世纪 50 年代初开始应用于生命科学研究, 50 年代后期至 60 年代初开始应用于自然界水循环过程, 70 年代后期至 80 年代初又被应用于研究降水径流过程, 为流量过程线的划分及定量确定降水和基流在流域产流中所占的比例提供了较完善的理论基础, 90 年代后稳定同位素技术应用于确定水文地质参数和定量评价地下水动力学特征, 其中国际原子能机构 (IAEA) 先后发起了 2 次国际协作研究计划 (CRP), 开发了更接近于实际的同位素模型。

稳定同位素技术能够突破传统水文研究方法的

\* 收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2019-09-19; 网络出版日期: 2019-10-21。

基金项目: 国家自然科学基金 (31670720, 31870716); 林业公益行业专项 (201504423)。

第一作者: 徐庆, 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事森林生态、森林水文和稳定同位素生态学研究, E-mail: xuqing@caf.ac.cn。

局限性,在流域生态系统水文过程定量研究中具有广阔的应用前景。近年来,越来越多的学者运用稳定同位素技术,对流域水文过程中各水体氢氧同位素组成、形成原因及其转化关系进行了研究,为全面理解流域生态系统水循环过程及其对全球变化响应机制提供了科学依据。

## 1 大气降水氢氧同位素特征及水汽来源

降水是流域生态系统水循环过程的重要输入因子和关键环节。在水汽形成、降落、蒸发和凝结过程中会发生氢氧同位素分馏作用。因此,通过分析降水氢氧同位素组成可指示流域大气降水水汽来源以及气候变化对水文过程的影响机制。冯芳等<sup>[2]</sup>通过分析祁连山排露沟流域降水氢氧同位素特征及水汽来源发现,该流域降水  $\delta^{18}\text{O}$  的季节变化明显,即降水  $\delta^{18}\text{O}$  值冬季较低、夏季较高;流域降水中  $\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O})$  值与日均气温存在正相关关系,夏季水汽主要来源于西风环流,而冬季水汽受西风环流和极地气团共同影响。珠江流域降水  $\delta^{18}\text{O}$  值呈现旱季高、雨季低的特点<sup>[3]</sup>。祁连山东段古浪河流域降水  $\delta^{18}\text{O}$  值呈现明显的夏秋高、冬春低的特征,降水  $\delta^{18}\text{O}$  月均值随海拔升高呈下降趋势,过量氘(d)值随海拔升高呈增高趋势<sup>[4]</sup>;黄河中游地区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  值空间分布呈东南向西北升高的趋势<sup>[5]</sup>。

流域降水  $\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O})$  值的时空变化受多种因素影响。Ma 等<sup>[6]</sup>根据中国西北石羊河流域大气降水  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值得出该地区大气降水线,由于西北干旱地区的降水  $\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O})$  值受蒸发过程影响明显,导致过量氘(d)值小于 8‰。海河流域大气降水  $\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O})$  值季风期相对贫化,降水主要来自海洋水汽输送,而非季风期大气降水  $\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O})$  值则相对富集,主要来自大陆水汽输送<sup>[7]</sup>。

大规模环流效应通过控制水分来源变化及影响因子(温度、压强和湿度)等,进而引起流域降水氢氧同位素组成的变化。例如,黄一民等<sup>[8]</sup>分析了洞庭湖流域降水  $\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O})$  与厄尔尼诺/拉尼娜和南方涛动(ENSO)之间的关系,发现降雨的  $\delta^{18}\text{O}$  值与降水量、温度在日尺度和月尺度上均呈负相关,降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值与 ENSO 的海面温度(SST)则呈显著正相关。Cui 等<sup>[9]</sup>研究发现我国四川卧龙巴郎山流域高山草甸的雨水和雾水中过量氘(d)值偏高,表明高山草甸的大部分降水来自于该高山草甸正下方的亚高山森

林二次蒸发水,而雾水则来自于雨后产生的蒸发水。Bottyán 等<sup>[10]</sup>采用  $\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O})$  定量研究了匈牙利东部 K-Pusztá 地区的水汽来源,发现对该地区降水水汽水源的贡献分别为地中海地区(57.0%)、当地水汽(14.8%)、大西洋地区(14.2%)、北欧地区(7.4%)和东欧地区(6.6%)。

## 2 流域降水与径流的关系

降水与径流是流域生态系统水循环过程中的重要组成部分。运用稳定同位素技术研究流域径流形成机制和径流组分划分,能够判定径流的水分来源及不同组分所占的比例,从而揭示降水与径流的关系及流域产流过程等。随着同位素质谱仪技术的不断完善,稳定同位素逐渐成为径流分割及产流方式划分的重要技术手段。

### 2.1 径流分割

运用稳定同位素技术进行径流分割可以准确计算 1 次降雨事件中不同水源的补给比例,有助于定量阐明流域水循环过程和径流产流机制等问题<sup>[11]</sup>。杨洪越等<sup>[12]</sup>研究发现,锡林河流域河水中  $\delta^{18}\text{O}$  值沿流程增加而增大,这主要是由于高  $\delta^{18}\text{O}$  值的地下水补给作用和河水的蒸发作用共同影响造成的。徐庆等<sup>[13]</sup>运用氢氧同位素研究卧龙巴郎山流域暗针叶林山脚下皮条河河水的水分来源发现,四川四姑娘山的雪水补给皮条河河水主要在 11 月至次年 6 月。Suarez 等<sup>[14]</sup>利用  $\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O})$  和水化学示踪剂对南非卡普流域的径流组分进行了量化研究,水文过程线分割结果显示该流域的径流主要来自地下水,其中 2 组水文过程线分离结果显示地下水占总径流的 64%~98%,而通过 3 组水文过程线分离方法可将径流进一步分为直接径流组分、浅层和深层地下水组分,分别占总径流的 41%、45% 和 84%。Mosquera 等<sup>[15]</sup>运用氢氧同位素示踪技术研究安第斯山的帕拉莫生态系统降雨—径流动力学过程发现,在高海拔热带地区湿地是该河流径流的主要来源,且对径流水源贡献的变化受前期土壤湿度、降雨强度和雨季持续时间的影响。Liu 等<sup>[16]</sup>运用氧同位素研究了我国长江上游黑水流域不同景观特征对径流量的影响,基于  $\delta^{18}\text{O}$  的双分量水文过程线分割计算表明,新降水对 B 支流的相对贡献最大(43%),对 I 支流的相对贡献最小(<5%);线性回归分析表明地形(海拔和坡度)是影

响新降水对河水贡献的最重要因素。Song 等<sup>[17]</sup>通过测定青藏高原左冒孔流域降水及河川径流  $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 以量化径流中新水的比例, 结果发现, 该流域 15% 的径流由新水组成, 且植被覆盖显著影响径流中新水的比例。

## 2.2 流域产流方式划分

运用稳定同位素探究流域的径流产流方式可示踪水分运动路径, 为揭示径流的形成机制、解决下垫面水土流失、洪涝灾害等提供科学指导。郭晓军等<sup>[18]</sup>运用氢同位素技术研究发现, 在云南东川蒋家沟流域壤中流产流的前期, 雨前土壤水占 86.46%; 然而随着降雨时间的持续, 新的雨水逐渐取代雨前土壤水, 导致产流中本次降雨的比例逐渐升高, 试验结束时达 85.63%。肖雄等<sup>[19]</sup>分析了青海湖流域高寒草甸大气降水、土壤水和壤中流中的  $\delta D$  ( $\delta^{18}O$ ) 组成, 发现流域高寒草甸壤中流的水分来源与其地形、土壤深度密切相关, 即坡下壤中流多源于降雨前储存于土壤中的水分, 而坡中土壤上层 (0—40 cm) 壤中流则主要源于大气降水, 坡中土壤下层 (40—80 cm) 壤中流主要来源于雨前土壤水。潘钊等<sup>[20]</sup>基于河道径流量及雨水和河水中氢同位素 ( $\delta D$ ) 分析发现, 前期越湿润, 流域储水的能力越弱, 导水力越强, 降水对河流径流的贡献越大; 降雨强度越大, 降水占河流径流的比重越大, 对河道径流的贡献也越大。Gibson 等<sup>[21]</sup>通过测定加拿大阿尔伯特塔东北部湖泊流域的氢氧同位素值来分析其产水量和径流比, 结果表明, 冻土融化产水量每年对湖泊流域的贡献高达数百毫米。

## 3 非饱和带土壤水分运移

氢氧稳定同位素技术可较好地示踪水分在土壤剖面中的运移路径和速度<sup>[22-23]</sup>。Liu 等<sup>[24]</sup>研究发现, 长江源头集水区高山灌丛降水和林冠穿透水通过影响土壤优先流进而影响 0—50 cm 土壤水的氢氧同位素组成, 即使中等量级的降水 (15.0 mm 和 18.9 mm), 其对 0—50 cm 土壤的平均有效补给时间依旧为 3~5 d。Gazis 等<sup>[25]</sup>运用氧同位素研究非饱和带的土壤水运移速率和运移机制发现, 在相对较大的低<sup>18</sup>O 降雨后, 雨水在浅层土壤中的入渗以活塞流为主, 并伴随与旧水混合, 而深层土壤水 (>50 cm) 仅在融雪或大量降雨时才能得到补给。氢氧同位素为揭示土壤水分运移机制提供了良好的技术手段, 但在运用单一同位素研究生态系统水循环过程, 由于水样

测定、复杂环境因子影响等方面存在产生误差, 因此与水化学示踪剂方法等结合来研究土壤水和壤中流的水分来源和运移机制将会更富有成效。

## 4 植物水分来源及利用

植物对水分的吸收和利用模式在一定程度上反映了流域植被生态系统对环境水分状况的响应, 且流域周边的不同生活型植物的水分利用来源有较大差异。由于植物根系从土层中吸水及随后沿导管向上传输中, 氢氧同位素一般不发生分馏, 故比较植物木质部水与潜在水源的氢氧同位素值能够区分该植物水分来源<sup>[26]</sup>。吴华武等<sup>[27]</sup>通过 D 和<sup>18</sup>O 同位素研究发现, 青海湖流域芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 在干旱条件下主要利用 0—30 cm 土壤水, 当 0—30 cm 土壤水分减少时即转为吸收较深层土壤水, 这表明芨芨草根能敏感地响应土壤水分的变化。王勇等<sup>[28]</sup>运用氢氧同位素研究塔里木河流域胡杨 (*Populus euphratica*) 和怪柳 (*Tamarix ramosissima*) 的水分来源发现, 胡杨主要利用 0—60 cm 浅层土壤水, 而怪柳则主要利用 160—300 cm 深层土壤水和地下水, 表明怪柳适应干旱环境的能力更强。Liu 等<sup>[29]</sup>运用氢氧稳定同位素分析我国岷江流域卧龙自然保护区榿皮树 (*Quercus aquifolioides*) 和柳树 (*Salix luctuosa*) 的水分利用来源发现, 这 2 种亚高山植物主要利用土壤剖面上层 (0—30 cm) 的水分, 且其水分吸收模式与根系生物量分布及土壤含水量呈显著正相关。

植物体内的碳稳定同位素 ( $\delta^{13}C$ ) 与其水分利用效率 (*WUE*) 之间存在较好的相关性, 因此可通过测定植物组织内<sup>13</sup>C 指示植物长期的 *WUE*。魏特等<sup>[30]</sup>研究发现, 黄土高原六道沟流域小叶杨 (*Populus simonii*) 叶片  $\delta^{13}C$  和瞬时水分利用效率 (*WUEi*) 均随冠层高度的增加而增加, 叶片  $\delta^{13}C$  与植物水分利用效率呈正相关关系, 叶片  $\delta^{13}C$  能真实反映其长期水分利用状况。杨国敏等<sup>[31]</sup>研究黄土高原六道沟流域典型灌木柠条 (*Caragana korshinskii*) 和沙柳 (*Salix psammophila*) 的水分利用效率及生理生态适应机制发现, 旱季柠条和沙柳的水分亏缺严重, 能够通过降低气孔导度、减小水分损失以获得较高的碳同化速率, 维持较高的水分利用效率以适应干旱环境。袁亚鹏等<sup>[32]</sup>研究发现, 黑河下游不同生境胡杨  $\delta^{13}C$  值随干旱胁迫程度增加呈现明显偏正趋势, 与枯枝比 (枯枝与所有枝条的比例) 呈显著正相关关系, 表明枯枝

比可替代碳同位素指示胡杨受干旱胁迫的程度。

## 5 土壤水与地下水转化

天然水中的氢氧同位素记录着不同水体之间转化的重要信息,因而稳定同位素在研究土壤水与地下水之间相互转化过程方面具有独特的优势,能够精确阐明降水在土壤中入渗、蒸发和运移等过程。徐学选等<sup>[33]</sup>采用氢氧同位素分析黄土丘陵区燕沟流域雨季不同水体之间的转化关系发现,土壤中稳定入渗水可以补给地下水,地表水、土壤水和地下水三者之间存有一定水力联系。吉磊<sup>[34]</sup>研究发现,新疆天山北坡玛纳斯河流域上游地区30—100 cm土壤水氢氧同位素值接近地下水线性回归方程(GWL),而中下游地区土壤水氢氧同位素值则明显偏离GWL,尤其是0—30 cm的土壤水,这表明上游土壤水与地下水有一定的补给关系。Xiang等<sup>[35]</sup>采用氢氧同位素定量分析黄土高原深层非饱和带的双重补给机制发现,活塞流对地下水总补给量的贡献占62%,而优先流仅占38%,这表明该地区土壤中的水主要以活塞流的形式补给地下水。Demlie等<sup>[36]</sup>运用 $\delta D(\delta^{18}O)$ 、 $Cl^{-}$ 研究埃塞俄比亚中部阿卡基流域地下水的补给模式发现,该流域地下水补给主要发生在降水量充足的夏季(6月底到9月初),在补给过程中优先流与活塞流同时存在。

## 6 地表水与地下水转化

大多学者运用同位素探究流域地表水与地下水之间的关系,主要集中在界定地表水和地下水来源、径流路径以及不同层次地下水的水力联系等方面<sup>[37-39]</sup>。胡玥等<sup>[40]</sup>运用氢氧同位素研究黑河流域水循环过程,结果表明,黑河上游山区大气降水是全流域主要水源,在地表水流经中游盆地过程中与地下水发生多次转换;中、下游浅层地下水主要受上游地下水的侧向补给,而深层地下水不仅接受河流及山区地下水入渗补给,也接受地质历史时期的“旧”水补给。姚天次等<sup>[37]</sup>测定湘江流域岳麓山周边地区不同水体中D、 $^{18}O$ 同位素值发现,该地区地表水、土壤水和浅层地下水的补给水源主要是大气降水,且在补给过程中伴随着一定程度的蒸发作用及与其他水体的混合作用。文广超等<sup>[38]</sup>以溶解性总固体(TDS)、氯离子( $Cl^{-}$ )和氧同位素( $^{18}O$ )作为示踪剂分析青海巴音河流域地表水与地下水的转化关系发现,沿巴音河

流向地表水与地下水之间水力联系密切,两者相互转化频繁。Rautio等<sup>[39]</sup>采用氢氧稳定同位素(D、 $^{18}O$ )、溶解态硅(DSi)及其主要离子组成作为示踪剂指示芬兰北部湖泊流域内的地下水—地表水相互作用过程,研究发现稳定同位素更适用于研究湖泊环境的水文过程。Martinez等<sup>[41]</sup>通过测定澳大利亚昆士兰东南部康达明河流域地下水及河川径流的 $\delta D(\delta^{18}O)$ 和 $Cl^{-}$ 发现,该流域北部及上游区地下水对河川径流的贡献率分别为20%~70%和8%~50%。

## 7 同位素水文模型应用

利用同位素模块与传统水文模型耦合建立的同位素水文模型可更加精准地刻画流域水循环过程及机制,与以往单一注重水量与水质模拟的传统水文模型相比,同位素水文模型不仅能够结合降雨、土壤水、地下水、河道水氢氧同位素变化信息,还能够提高模型结构的合理性,降低模型参数和模型预测的不确定性。目前,国内外学者基于同位素数据的水文模型应用方面也开展了一些有意义的探索。例如,王康等<sup>[42]</sup>开发了基于SWAT模型的流域河道硝酸盐 $\delta^{15}N$ 和 $\delta^{18}O$ 模拟方法,分析表明釜溪河流域河流中硝酸盐 $\delta^{15}N$ 和 $\delta^{18}O$ 的模拟值与监测值吻合较好。Soulsby等<sup>[43]</sup>采用逐日的降水和河流氢氧同位素数据校准和测试了一个简练的示踪剂辅助径流模型,从而评估动态存储机制和非线性水文连通性对时变河流水年龄的影响。Cable等<sup>[44]</sup>采用基于氢氧同位素(D、 $^{18}O$ )实测数据的贝叶斯混合模型估算冰川融水对怀俄明州风河山脉丁伍迪(Dinwoody)溪流流量的贡献,发现冰川融水对径流的贡献较大,表明冰川的消失可能会影响夏季和低积雪年份的河岸生态系统和人类的供水。Windhorst等<sup>[45]</sup>采用基于Richards方程的流域模型框架(CMF)模拟了热带山地草坡样带垂直土壤剖面氢氧稳定同位素的二维动态分布,分析表明预测值与实测值具有较好的一致性。Stets等<sup>[46]</sup>开发了基于湖泊地表水氧同位素特征的描述性时间序列模型,将该模型应用于湖泊水文过程模拟分析时发现,模拟和观察到的所有湖泊中 $\delta^{18}O$ 值高度相关,进一步验证该模型同样适用于水力停留时间不同的开放和封闭盆地湖泊。

## 8 研究中存在问题及展望

稳定同位素在流域生态系统水文过程研究中的

应用日益受到关注,极大地推动了稳定同位素流域生态水文的学科发展。然而也存在一些不足,主要包括:1)前人研究大多集中在流域水文过程中的某个单一环节,缺乏从整体上对流域水文过程系统和定量的研究;2)已有研究大多为小流域尺度,而大中尺度定量研究偏少,不利于揭示大尺度流域水文过程与规律;3)由于某些流域水文过程研究周期较长,短周期的同位素采样不能有效保证时间上的连续性,空缺的数据大多通过随机插值或参考邻近地区研究结果生成,在一定程度上制约了稳定同位素反演大流域水文过程的精度;4)当前大多数研究集中在定性描述或初步定量研究方面,流域水循环过程及机制的深层次定量研究仍不足,且人们对利用稳定同位素技术解决流域生态水文过程关键科学问题的优势和重要性认识还不够;5)流域水循环过程日益受到全球气候变化带来的诸多不确定性因素和人为活动干扰等影响,如何借助同位素示踪技术揭示大气降水、地表水、土壤水和地下水之间的转化过程以及人类活动等对流域水文过程的影响机制,这方面系统和定量的研究需进一步加强。

随着同位素技术和遥感技术的进步,稳定同位素技术必将在流域生态系统水文过程研究中得到更广泛地应用。一方面,多种稳定同位素联合示踪在流域水文中的应用需要进一步加强;另一方面,稳定同位素方法与水化学方法、常规水文学方法等相结合,大尺度和大数据整合与分析,创新发展流域生态系统水循环过程定量研究模式和理论体系。

### 参 考 文 献

- [1] 靳宇蓉,鲁克新,李鹏,等. 基于稳定同位素的土壤水分运动特征[J]. 土壤学报,2015,52(4):792-801.
- [2] 冯芳,冯起,刘贤德,等. 祁连山排露沟流域降水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  特征及水汽来源[J]. 中国沙漠,2017,37(5):997-1005.
- [3] 郭政昇,王娟,赵培. 珠江流域大气降水稳定性氢氧同位素特征[J]. 水文,2017,37(2):78-82.
- [4] 桂娟,李宗省,冯起,等. 古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义[J]. 环境科学,2019,40(1):149-156.
- [5] 郭政昇,郑国璋,赵培,等. 水汽源区变化对黄河中游降水稳定同位素的影响[J]. 自然资源学报,2018,33(11):1979-1991.
- [6] MA J, ZHANG P, ZHU G, et al. The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang River system, northwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 436/437 (3): 92-101.
- [7] 庞朔光,赵诗坤,文蓉,等. 海河流域大气降水中稳定同位素的时空变化[J]. 科学通报,2015,60(13):1218-1226.
- [8] 黄一民,宋献方,章新平,等. 洞庭湖流域降水同位素与 ENSO 关系研究[J]. 地理科学,2017,37(5):792-798.
- [9] CUI J, AN S Q, WANG Z S, et al. Using deuterium excess to determine the sources of high-altitude precipitation: implications in hydrological relations between sub-alpine forests and alpine meadows [J]. Journal of Hydrology, 2009, 373 (1/2): 24-33.
- [10] BOTTYÁN E, CZUPPON G, WEIDINGER T, et al. Moisture source diagnostics and isotope characteristics for precipitation in east Hungary: implications for their relationship [J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(12):2049-2060.
- [11] 汪集勇,陈建生,陆宝宏,等. 同位素水文学的若干回顾与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):406-413.
- [12] 杨淇越,吴锦奎,丁永建,等. 锡林河流域地表水和浅层地下水的稳定同位素研究[J]. 冰川冻土,2009,31(5):850-856.
- [13] 徐庆,蒋有绪,刘世荣,等. 卧龙巴郎山流域大气降水与河水关系的研究[J]. 林业科学研究,2007,20(3):297-301.
- [14] SUAREZ V C, OKELLO S, WENNINGER J, et al. Understanding runoff processes in a semi-arid environment through isotope and hydrochemical hydrograph separations [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(10):4183-4199.
- [15] MOSQUERA G M, CÉLLERI R, LAZO P X, et al. Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(17):2930-2947.
- [16] LIU Y H, LIU F D, DORLAND E, et al. Water isotope technology application for sustainable eco-environmental construction: effects of landscape characteristics on water yield in the alpine headwater catchments of Tibetan Plateau for sustainable eco-environmental construction [J]. Ecological Engineering, 2015, 74:241-249.
- [17] SONG C L, WANG G X, LIU G S, et al. Stable isotope variations of precipitation and streamflow reveal the young water fraction of a permafrost watershed [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(4):935-947.
- [18] 郭晓军,崔鹏,朱兴华. 泥石流多发区蒋家沟流域的下渗与产流特点[J]. 山地学报,2012,30(5):585-591.
- [19] 肖雄,李小雁,吴华武,等. 青海湖流域高寒草甸壤中水分来源研究[J]. 水土保持学报,2016,30(2):230-236.
- [20] 潘钊,孙自永,马瑞,等. 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,2018,43(11):4226-4236.
- [21] GIBSON J J, BIRKS S J, YI Y, et al. Runoff to boreal lakes linked to land cover, watershed morphology and permafrost thaw: a 9-year isotope mass balance assessment [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(18):3848-3861.
- [22] 徐英德,汪景宽,高晓丹,等. 氢氧稳定同位素技术在土壤水研究上的应用进展[J]. 水土保持学报,2018,32(3):1-9,15.
- [23] KOENIGER P, GAJ M, BEYER R M, et al. Review on soil water isotope-based groundwater recharge estimations [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(16):2817-2834.
- [24] LIU Y H, LIU F D, XU Z, et al. Variations of soil water isotopes and

- effective contribution times of precipitation and throughfall to alpine soil water, in Wolong Nature Reserve, China [J]. *Catena*, 2015, 126:201 – 208.
- [25] GAZIS C, FENG X. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths [J]. *Geoderma*, 2004, 119 (1/2): 97 – 111.
- [26] 徐庆, 冀春雷, 王海英, 等. 氢氧稳定同位素在植物水分利用策略研究中的应用 [J]. *世界林业研究*, 2009, 22(4): 41 – 46.
- [27] 吴华武, 李小雁, 蒋志云, 等. 基于  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的青海湖流域芨芨草水分利用来源变化研究 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (24): 8174 – 8183.
- [28] 王勇, 赵成义, 王丹丹, 等. 塔里木河流域不同林龄胡杨与柽柳的水分利用策略研究 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 157 – 163.
- [29] LIU Y H, XU Z, DUFFY R, et al. Analyzing relationships among water uptake patterns, rootlet biomass distribution and soil water content profile in a subalpine shrubland using water isotopes [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(6): 380 – 386.
- [30] 魏特, 王力, 杨国敏. 六道沟流域不同冠层小叶杨光合特性及水分利用效率研究 [J]. *西北植物学报*, 2017, 37(11): 2247 – 2255.
- [31] 杨国敏, 王爱, 王力. 六道沟流域 2 种典型灌木不同季节水分来源及利用效率 [J]. *西北植物学报*, 2018, 38(1): 140 – 149.
- [32] 袁亚鹏, 赵阳, 赵传燕, 等. 黑河下游不同生境胡杨 (*Populus euphratica*) 叶片碳同位素组成特征 [J]. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1505 – 1511.
- [33] 徐学选, 张北赢, 田均良. 黄土丘陵区降水 – 土壤水 – 地下水转化实验研究 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 16 – 22.
- [34] 吉磊. 基于氢氧稳定同位素的玛纳斯河流域地表水与地下水转化关系研究 [D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2016.
- [35] XIANG W, SI B C, BISWAS A, et al. Quantifying dual recharge mechanisms in deep unsaturated zone of Chinese Loess Plateau using stable isotopes [J]. *Geoderma*, 2019, 337: 773 – 781.
- [36] DEMLIE M, WOHNLIICH S, GIZAW B, et al. Groundwater recharge in the Akaki catchment, central Ethiopia: evidence from environmental isotopes ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^2H$  and  $^3H$ ) and chloride mass balance [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 21(6): 807 – 818.
- [37] 姚天次, 章新平, 李广, 等. 湘江流域岳麓山周边地区不同水体中氢氧稳定同位素特征及相互关系 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(7): 1198 – 1210.
- [38] 文广超, 王文科, 段磊, 等. 基于水化学和稳定同位素定量评价巴音河流域地表水与地下水转化关系 [J]. *干旱区地理*, 2018, 41(4): 734 – 743.
- [39] RAUTIO A, KORKKA – NIEMI K. Chemical and isotopic tracers indicating groundwater/surface – water interaction within a boreal lake catchment in Finland [J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(4): 687 – 705.
- [40] 胡玥, 刘传琨, 卢粤晗, 等. 环境同位素在黑河流域水循环研究中的应用 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(10): 1158 – 1166.
- [41] MARTINEZ J L, RAIBER M, COX M E. Assessment of groundwater-surface water interaction using long – term hydrochemical data and isotope hydrology: headwaters of the Condamine River, Southeast Queensland, Australia [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 536: 499 – 516.
- [42] 王康, 冉宁, 林忠兵, 等. 基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐  $\delta^{15}N$  和  $\delta^{18}O$  模拟 [J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 68 – 76.
- [43] 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.
- [44] CABLE J, OGLE K, WILLIAMS D. Contribution of glacier meltwater to streamflow in the Wind River Range, Wyoming, inferred via a Bayesian mixing model applied to isotopic measurements [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(14): 2228 – 2236.
- [45] WINDHORST D, KRAFTRAF P, TIMBE E, et al. Stable water isotope tracing through hydrological models for disentangling runoff generation processes at the hillslope scale [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(10): 4113 – 4127.
- [46] STETS E G, WINTER T C, ROSENBERY D O, et al. Quantification of surface water and groundwater flows to open – and closed – basin lakes in a headwaters watershed using a descriptive oxygen stable isotope model [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(3): 1 – 16.