

DOI: 10.5846/stxb202003020380

孙龙, 陈利顶, 杨磊. 基于氢氧同位素技术的流域水源涵养研究进展. 生态学报, 2020, 40(24): 8872-8881.

Sun L., Chen L. D., Yang L. Catchment water conservation based on stable hydrogen and oxygen isotopes: a review. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 8872-8881.

基于氢氧同位素技术的流域水源涵养研究进展

孙 龙¹, 陈利顶^{1,2,*}, 杨 磊¹

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 水源涵养有助于拦蓄降水、调节径流, 影响着生态系统水文调节、水质净化等功能。在城市化及气候变化的背景下, 水资源供需矛盾、水体污染等生态环境问题不断加剧。深入理解流域水源涵养过程、能力及作用是防治上述生态环境问题的基础。随着同位素水文学的发展, 同位素技术在水文水资源研究中的优越性逐渐得到凸显。氢氧同位素是天然示踪剂, 在水分溯源、水分滞留时间估算等方面具有独特优势。但相关研究多关注水文过程的某一具体方面, 没有形成系统、明确的水源涵养研究框架。为更好地促进氢氧同位素技术在水源涵养研究中的应用, 研究总结了应用氢氧同位素技术刻画水源涵养过程、能力和作用的相关研究。从水源涵养的能力估算、过程刻画、水源涵养的“蓝”“绿”作用等方面, 梳理了基于氢氧同位素技术的水源涵养研究框架, 明确了本领域亟待加强的研究方向。研究对于理解流域水源涵养的机理、科学评估水源涵养服务价值等方面具有重要的理论和实践意义。

关键词: 水源涵养; 氢氧同位素; 平均滞留时间; 水分来源识别; 小流域

Catchment water conservation based on stable hydrogen and oxygen isotopes: a review

SUN Long¹, CHEN Liding^{1,2,*}, YANG Lei¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Eco-environmental concerns, such as water supply and demand imbalance, water pollution, have been increasingly prominent with the rapid urbanization and climate change. Water conservation/storage in catchments affects the ecosystem functions of hydrological regulation and water purification. A deep understanding of the process and capacity of water storage is the basis for managing the above-mentioned eco-environmental concerns. With the development of isotope hydrology, the superiority of isotope technology in the study of hydrology and water resources has gradually become prominent. Hydrogen and oxygen isotopes are inherent properties of water and play an important role in studies such as water traceability and water residence time estimation. However, most related studies only paid attention to a certain aspect of the hydrological process, remaining absence of a clear research framework of water conservation. To promote the applications of hydrogen and oxygen isotopes in water-storage related studies, this study summarizes the researches on the application of hydrogen and oxygen isotope to characterize the process, ability, and effects of water storage. The research framework and direction of water storage using hydrogen and oxygen isotope is summarized in terms of the process, capacity, and the effects of water conservation/storage. The study has important theoretical and practical meaning for understanding the water

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41701018)

收稿日期: 2020-03-02; 网络出版日期: 2020-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@cees.ac.cn

conservation/storage mechanism of the basin and assessing the value of water conservation/storage services.

Key Words: water conservation/storage; hydrogen and oxygen isotopes; mean residence time; water sources identification; small catchment

水源涵养功能有助于拦蓄降水、调节径流,影响着生态系统水文调节、水质净化等功能,是陆地生态系统重要的生态系统服务之一^[1-3]。在人口增长、城市化及气候变化的背景下,水体污染、水资源供需矛盾等生态环境问题不断加剧,水源涵养需要以更加系统、动态的视角深入研究^[4-6]。水源涵养相关研究多关注水源涵养能力的估算,但仅仅估算水源涵养能力,往往难以体现流域水源涵养过程及作用^[7-10]。随着同位素水文学的发展,同位素技术在水文水资源的研究中的优越性逐渐得到凸显^[11-16]。氢氧同位素作为天然示踪剂,在水分溯源、水分输移时间估算等研究中发挥着重要作用^[14, 17-20]。氢氧同位素在生态系统中天然存在,且通常在不同客体中同位素构成不同,从而为溯源追踪提供了可能性。因此,基于氢氧同位素示踪技术刻画的水分来源、平均滞留时间等,能够系统反映流域水分从哪里来、到哪里去、如何运移、存留多长时间等问题^[21],对于深入理解水源涵养过程和能力具有重要意义。

近来,氢氧同位素技术在流域水文过程刻画的研究中得到广泛应用,但相关研究常关注水文过程的某一方面,如水分来源、水分滞留时间、降雨-径流关系等^[22-24]。这些研究涉及了生态系统内涵养水分的来源、作用和周转时间,但并没有形成系统、明确的水源涵养研究框架,阻碍了同位素技术在流域水源涵养研究中的应用(图1)。为更好地促进同位素技术在水源涵养相关研究中的应用,本文总结了应用氢氧同位素技术刻画水分滞留时间、来源等相关研究,概括了基于氢氧同位素技术的水源涵养研究框架,进而明确了应用氢氧同位素技术的水源涵养研究亟待加强的方向。研究对于理解流域水源涵养内涵、机理以及评估水源涵养效益等方面具有重要的理论和实践意义。

1 水源涵养内涵

根据不同的角度,水源涵养量的估算方法有水量平衡法、蓄水能力法、降水储存量法、年径流量法、地下径流增长法、模型模拟和卫星遥感等^[25-29]。不同估算方法定义的水源涵养内涵存在一定差异(图2)。水量平衡法定义的水源涵养是指收入水分与支出水分的差值,即降水减去径流、蒸散发(图2角标2所示范围),即生态系统内的存余水量,既不包含供给植物水分利用的部分,也不包含补给河道径流的部分。蓄水能力法定义的水源涵养是指冠层、凋落物层和土壤层的持水(图2角标3所示范围)。以土壤层为例,土壤的最大涵养量包含补给河道径流、供给植物利用的部分^[30]。降水储存量法定义的水源涵养是指降水减去冠层拦截及蒸散发作用后的水量(图2角标1所示范围),包括补给河道径流或地下水的部分^[5, 28]。地下径流增长法定义的水

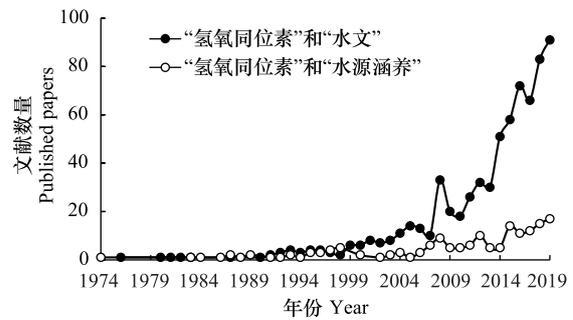


图1 Web of Science 数据库不同主题文献数量
Fig.1 Published papers with different topics in Web of Science

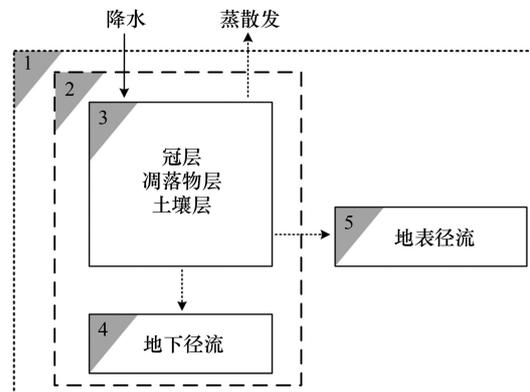


图2 不同估算方法水源涵养内涵差异示意图
Fig.2 Schematic diagram of concepts of water conservation based on different estimation methods

源涵养主要指林地与裸地相比,地下径流增长的部分(图2角标4所示范围)。年径流量法定义的水源涵养主要指林地与裸地相比,地表径流减少的部分(图2角标5所示范围)。可见,不同估算方法其水源涵养的内涵不同。但不管角度如何,水源涵养根本上是一定时间和空间范围内生态系统保持水分的过程和能力^[31]。

水源涵养内涵的明确对于准确评估水源涵养服务功能及其价值具有重要意义。吕一河等^[31]从“绿水”(降水入渗并存储在土壤根层中的水量,通过蒸散支持植物的初级生产)和“蓝水”(超过土壤入渗和存储能力的降水对地表水或地下水形成补给的水量)的概念出发,认为最大水源涵养量中会有一部分转换为“蓝水”,从而产生淡水供给、径流调节等服务。而稳定水源涵养量(如小于等于田间持水量的部分)主要用于植物生长发育的消耗,相当于“绿水”,从而发挥固碳、小气候调节等效应,但是无法直接形成水资源供给服务。无论是从水源涵养量估算方法的角度,还是从生态系统服务的角度,水源涵养的内涵需要加以明确和区分^[28, 31]。此外,生态系统内的水分向发蒸散发或径流转化是一个动态过程(图2虚线箭头)。水源涵养量是一个随着时间变化的函数,具有时间依赖性。这一时间依赖性既强调了准确辨析水源涵养内涵的重要性,又强调了对水源涵养过程认识的必要性。生态系统是相互联系相互影响的有机系统,生态系统内水分向蒸散发或径流转化过程涉及多时间尺度(日、月、季节、年等),在针对不同研究问题时需要加以辨析。

2 基于氢氧同位素技术的水源涵养刻画方法

稳定同位素是自然界广泛存在的、不发生或极其不易发生衰变的同位素,常用的稳定同位素有氢(²H)、氧(¹⁸O)、碳(¹³C)、氮(¹⁵N)等。氢氧同位素示踪技术是以氢氧同位素作为示踪剂,用以追踪研究对象的运行和变化规律的方法。在水循环的不同环节中,氢氧同位素通常具有不同的同位素构成,使其成为一种可以示踪水分来源、路径的有效工具^[32-33],广泛应用于水分来源识别、水流路径刻画、区域水循环甚至气候演变等研究^[14, 17, 20, 34-35]。氢氧同位素值($\delta, ‰$)以相对于维也纳标准平均海洋水(Vienna Standard Mean Ocean Water)的千分形式表示:

$$\delta X = (R_{\text{sample}}/R_{\text{V-SMOW}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中, X 表示D或¹⁸O,D即²H; δX 即表示样品的氢或氧的同位素组成(‰); R_{sample} 表示抽提水中氢或氧的重同位素和轻同位素丰度之比,即¹⁸O/¹⁶O或D/H; $R_{\text{V-SMOW}}$ 表示维也纳标准平均海水(Vienna Standard Mean Ocean Water)的¹⁸O/¹⁶O和D/H值。

基于氢氧同位素技术的水源涵养研究框架如图3所示,通过应用氢氧同位素技术的水分平均滞留时间估算、水分来源识别,明确流域水源涵养能力、过程与作用。水分滞留时间影响着生物地球化学循环过程、污染物的留存等^[21, 36]。较长的水分滞留时间意味着水分与不同水源涵养载体接触时间更久、混合程度或化学反应程度更大。因此,基于氢氧同位素技术的水源涵养研究,从传统涵养能力估算向涵养过程和作用刻画转变,有助于水源涵养研究的加强和拓展、水源涵养服务的合理评估以及生态系统不同服务间的联系。

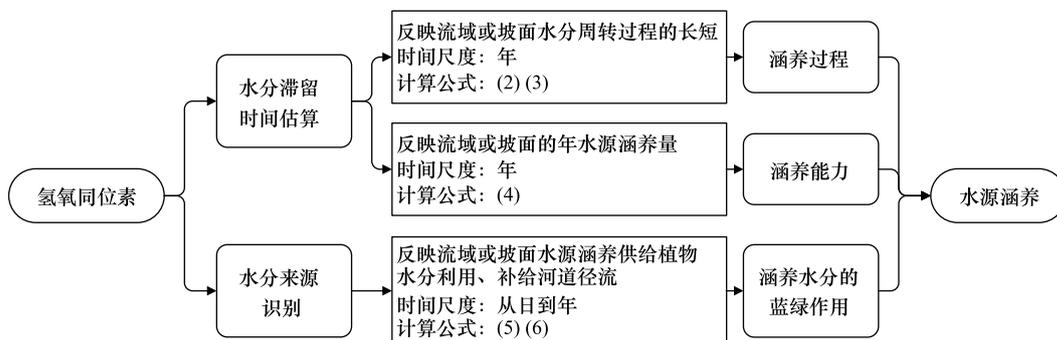


图3 基于氢氧同位素的水源涵养研究框架

Fig.3 Research framework for water storage based on hydrogen and oxygen isotopes

2.1 小流域水分滞留时间估算

滞留时间是指水分进入流域内,经过混合、扩散、运移到某一观测位置的时间,其观测位置因具体研究对象的不同而不同,如不同深度的土壤水、地下水(井水、泉水等)、河道径流等^[37-40]。若研究对象为流域出口径流,即水分从降雨输入到径流输出所经历的平均时间,则称为流域水分平均滞留时间(Mean Residence Time, MRT),表征流域所涵养水分周转过程的长短^[41-44]。水分滞留时间有多种估算方法,在应用示踪剂的研究中通常用集总参数法^[21, 45]。集总参数法以滞留时间分布模型为基础,常用分布模型如表 1 所示,指数模型应用最为广泛^[21, 36, 45-46]。

表 1 常用水分滞留时间分布模型

Table 1 Commonly used residence time distribution for catchments

模型 Model	描述公式 Equation	适用性 Applicability
指数 Exponential Flow Model (EM)	$\frac{1}{\tau_m} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_m}\right)$	基于稳态水流和充分混合假设,应用最广泛
指数活塞流 Exponential-Piston Flow Model (EPM)	$\left(\frac{\eta}{\tau_m}\right) \exp\left(-\frac{\eta\tau}{\tau_m} + \eta - 1\right)$	多用于含承压水系统,系统内等时线与流程近乎垂直
活塞流 Piston Flow Model (PFM)	$\Delta(\tau - \tau_m)$	基于无弥散作用假设,过于简化
伽马 Gamma Model (Gamma)	$\frac{\tau^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{\tau}{\beta}\right)$	应用光谱分析的单位过程线模拟
弥散 Dispersion Model (DM)	$\left(\frac{4\pi D_p \tau}{\tau_m}\right)^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{\tau} \exp\left[-\left(1 - \frac{\tau}{\tau_m}\right)^2 \left(\frac{\tau_m}{4 D_p \tau}\right)\right]$	对流-弥散方程的一维模型

τ 为时间; τ_m 为平均滞留时间; η 为指水分总体积与指数流体积之比,当 $\eta=1$ 时,EPM 模型即为 EM 模型,当 η 趋于 $+\infty$ 时,EPM 模型即为 PFM; Δ 是狄拉克 Δ 函数中的参数,为权重函数;Gamma 模型中 α 为形状参数; β 为尺度参数, $\tau_m = \alpha\beta$; D_p 为弥散系数

基于指数模型估算 MRT 首先是通过正弦函数模拟降雨与河道径流氢氧同位素季节变化,并根据模拟函数振幅的差异估算流域 MRT^[23, 40, 47]。正弦函数表示为:

$$\delta X = C + A \sin(\omega d - t) \quad (2)$$

式中, δX 表示 δD 或 $\delta^{18}O$ (‰); C 表示年均同位素比率(‰); A 表示同位素周期波动的振幅(‰); t 表示曲线相位位移或滞后(rad); d 表示观测天数(d); ω 表示周期波动的径向频率(rad/d),因为降雨同位素是年周期波动,因此本研究中正弦方程 $\omega = 2\pi/365$,如果是以月计,则表示为 $2\pi/12$ 。正弦回归分析中,降水同位素用降雨量作为权重。水分滞留或输移时间(T)可表示为:

$$T = \omega^{-1} \left[(A_s/A_r)^{-2} - 1 \right]^{0.5} \quad (3)$$

式中, A_s 、 A_r 分别表示为径流和降水同位素正弦拟合后的函数振幅(‰)。需要指出的是,基于此假设估算的平均滞留时间是近似值,但应用效果好,满足 MRT 的初步评估^[23, 40, 47]。流域的水源涵养量表示为:

$$S_o = R_y \text{MRT}/365 \quad (4)$$

式中, S_o 为流域年水分储量(mm); R_y 为流域年径流量(mm); MRT 为流域水分平均滞留时间(天),如单位为月,相应的分母为 12。

2.2 水分来源识别

当降水进入生态系统内,可划分为不同部分,例如入冠层截留、凋落物蓄水、土壤水、岩石裂隙水、供给植物、补给河道径流等。通常植物根系吸收的水分在到达叶片前不发生同位素分馏作用,即氢氧同位素组成不发生改变,因此可以利用氢氧同位素进行植物水分来源识别,径流溯源原理相同。水分来源识别的理论基础是求解多元一次方程组:

$$C_\alpha X_\alpha + C_\beta X_\beta + C_\gamma X_\gamma = X_{\text{out}} \quad (5)$$

$$C_{\alpha} + C_{\beta} + C_{\gamma} = 1 \quad (6)$$

式中, X_{out} 为“汇”的氢氧同位素值 (δD 或 $\delta^{18}\text{O}$); X_{α} 、 X_{β} 、 X_{γ} 为来“源”的氢氧同位素组成 (δD 或 $\delta^{18}\text{O}$); C_{α} 、 C_{β} 、 C_{γ} 为“源”对“汇”的贡献率。“汇”因研究对象的不同而不同,如树干茎水、径流等。水分的“源”形式上分为雨水、土壤水、岩石孔隙水等;按时间可分为次降水和前期储水。由于多元混合模型识别水分来源的原理是求解多元一次方程组,方程组解具有不唯一性,且自然界中通常具有多种来源,因此目前研究多采用 IsoSource 混合模型或者基于贝叶斯理论的混合模型 MixSIAR 等算法(软件)计算^[15-16, 32, 48]。

3 水源涵养过程、能力及作用

3.1 水源涵养过程

流域 MRT 反映流域水源涵养过程。例如, McGuire 等^[37]在美国宾夕法尼亚州的两个面积分别为 0.14 km² 和 1.0 km² 的小流域的研究发现,流域水分平均滞留时间分别为 9.5 个月和 4.8 个月。Soulsby 等^[47]在苏格兰的研究发现,子流域水分平均滞留时间在上下游之间存在差异显著,流域内上游子流域水分平均滞留时间在 2—4 个月之间,而下游的子流域水分平均滞留时间在 10—18 个月之间。流域水分平均滞留时间会因流域属性的不同而不同,说明不同流域内水分的涵养过程长短不一。早期研究认为流域 MRT 与流域面积有关,因为面积小的流域水分的运移路径短,所需运移时间短;随着流域面积增大,运移路径、时间增加,降水与前期储水混合程度增大^[49-50]。后续研究表明 MRT 主要受下垫面渗透性影响^[37, 39, 51]。Hale 和 McDonnell^[52]发现基岩渗透性强的流域其 MRT 与面积有关,而基岩渗透性弱的流域其 MRT 与水流路径系数(水流路径长度中值与梯度中值之比)显著相关。说明水源涵养过程受下垫面渗透性的影响,而渗透性又与土壤孔隙度等相关,因此水源涵养能力与过程在内涵上具有一定关联^[53-57]。

3.2 水源涵养能力

结合流域出口径流量,通过流域水分平均滞留时间可计算流域年水源涵养量^[58]。由公式 4 可知,基于氢氧同位素技术估算的是流域年水源涵养量,由年径流量及 MRT 共同决定。即便两个流域水源涵养量相似, MRT 也可能不同。其意义在于,流域水源涵养研究需要从量的估算向过程刻画更进一步。假设两个流域水源涵养量相同,则较短的 MRT 说明径流量大,水分留存时间短,水文过程相对迅速,易于旱涝失调,需要土地利用结构优化或修建水库等水利措施调控水资源供给规律。而较长的 MRT 说明径流量小,水分留存时间长,水资源供给时间尺度长,但水资源供给密度低,不利于水资源需求集中的区域。

3.3 水源涵养的“蓝”“绿”作用

研究水源涵养的目的不仅仅是刻画水源涵养过程及能力,还在于认识涵养的水分如何维持生态系统服务,例如供给植物吸收利用(“绿水”)、补给河道径流(“蓝水”)等。因为涵养的水分不管是供给植物还是补给河道径流,均是一个动态过程,所以水源涵养功能及其服务也是一个动态过程,这说明明确水源涵养的“绿水”、“蓝水”作用尤为重要。识别“绿水”、“蓝水”来源一方面有助于深入认识水源涵养的作用,另一方面还有助于合理评估水源涵养服务价值。

3.3.1 涵养水分供给植物水分利用

植物水分利用来源反映根区土壤水供给植物吸收利用的状况^[59-60]。由于季节性的水分亏缺,植物水分利用来源具有显著的季节转换特征^[61-63]。例如, Wang 等^[64]应用氢氧同位素示踪技术研究了黄土高原铁杆蒿、长芒草、黄荆的水分利用来源,结果表明三种植物吸收利用的水分主要来自 0—40 cm 土壤层。随着季节变化,黄荆吸收利用的水分由 0—40 cm 土壤层转为 120—300 cm 土壤层。Nie 等^[62]在喀斯特地区的研究表明,落叶的紫葳科菜豆树在旱季主要利用深层水源,在雨季利用雨水和深层水源;落叶的大戟科灌木红背叶主要利用次降水,但常绿树种在雨季主要利用深层水源。这说明不同深度土层涵养的水分,其“绿水”的价值不同。即(1)水源涵养的“绿水”作用要从植物水分利用来源的具体深度或位置来考虑,不能一概而论;(2)不同植物种具有不同的水分利用策略,相同的水源涵养状况对不同植物种意义不同;(3)干旱导致植物水分利

用来源发生转换,说明在不同季节要考虑不同深度的水源涵养状况。因此,基于氢氧同位素的植物水分利用来源识别,为深入认识水源涵养的“绿水”作用提供了可行的思路和方法。

3.3.2 涵养水分补给河道径流

基于氢氧同位素识别径流来源的研究中,水源的划分依照研究角度的不同而不同,按时间可将径流来源划分为次降水(也称为“新水”)和前期储水(也称为“老水”)。前期储水根据载体的不同又分为土壤水、岩石裂隙水、深层地下水等。土壤水还可进一步划分为可动水和不动水^[17, 20, 65]。可动水定义为土壤溶液取样器在 60—80 kPa 负压条件下吸取的土壤水^[17, 66-67],而剩余部分为不动水。可动水与不动水的氢氧同位素组成往往不同,这种可动性的区分有助于深入理解水源涵养的内涵,从而有助于进一步明确土壤层涵养水分的作用^[65, 68]。

流域水源涵养能力影响前期储水补给河道径流的比例。土壤层是生态系统水源涵养的主体,浅薄的土壤水源涵养能力有限,会导致次降雨对降雨引发的河道径流的贡献起到主导作用^[22]。高渗透性的基岩通常会导致径流中较大的前期储水比例,从而使河道径流主要受控于流域前期储水^[69]。此外,径流来源还受地形等因素影响,谷底冲击平原的面积增大会导致次降雨补给比例增加、前期储水补给比例减小。原因是谷底平原的面积增大且易于蓄满,导致蓄满产流进而增加了次降雨的贡献度^[70-71]。因此,径流来源识别明确了径流中不同来源的组分,反映流域涵养水分对河道径流的补给作用和程度。

4 应用氢氧同位素技术研究水源涵养的适用性

基于氢氧同位素技术研究水源涵养,有优势也有局限,总结为以下三个方面:

4.1 同位素方法与传统方法的结合

传统方法能够较为高效地估算水源涵养能力,弥补了基于同位素方法估算水源涵养能力需要至少一年数据序列的弊端。同位素方法与传统方法相结合,一方面补充传统方法只能揭示水源涵养能力的局限性,另一方面可用于比较估算的水源涵养能力的差异。水量平衡法只考虑水分的输入与输出,通过输入水量减去输水量估算水源涵养量^[3, 72-73]。基于 MRT 估算水源含氧量,同样仅考虑生态系统水分的输入与输出。两种方法共同应用可以避免单一方法的局限性。此外,应用不同方法估算的水源涵养量可以相互比较(表 2)。由公式 4 可知,水源涵养量是 MRT 与年径流量的函数。当流域全年有降水却无地表径流,基于公式 4 得出的水源涵养量为零,基于蓄水能力法估算的水源涵养量为正,基于水量平衡法估算的水源涵养量正、负、零均匀可能。可见,蓄水能力法倾向高估流域水源涵养量,水量平衡法与降水储量法适中,氢氧同位素技术依赖地表径流量。但基于氢氧同位素技术估算流域水源涵养量需要至少需要一年的数据序列,与传统的水源涵养量估算方法相比,成本高效率低。可见,基于同位素技术刻画水源涵养,其优势是水源涵养过程刻画和作用解析。

表 2 常用水源涵养量估算方法定性对比

Table 2 Comparison between commonly used models for water conservation/storage estimation

限定条件 Constraint condition		估算方法 Estimation method			
条件 1 Condition 1	条件 2 Condition 2	降水储存量 ¹ Precipitation storage	水量平衡 ² Water balance	蓄水能力 ³ Water-holding capacity	氢氧同位素 Stable hydrogen and oxygen isotopes
$P = ET + R$	$R > 0$	+	0	+	+
	$R = 0$	0	0	+	0
$P < ET + R$	$R > 0$	-	-	+	+
	$R = 0$	-	-	+	0
$P > ET + R$	$R > 0$	+	+	+	+
	$R = 0$	+	+	+	0

P 为年降水量; ET 为年蒸散量; R 为年径流量; 上标的 1, 2, 3 分别对应图 2 角标所示范围。正号(+)或负号(-)分别表示水源涵养量为正或负

4.2 水源涵养过程、能力、作用三方面结合

流域 MRT 可以用于表征流域水分的涵养过程,借助水分来源识别还可以进一步明确涵养水分供给植物吸收利用、补给河道径流的作用,有助于理清水源涵养功能表现出的生态系统服务重叠问题^[28, 31]。水量平衡法通常将生态系统作为“黑箱”处理,应用氢氧同位素技术的水分来源识别为认识黑箱内的组分及其变化提供了可能。例如,用蓄水能力法估算土壤层的水源涵养量,与基于氢氧同位素技术的水分滞留时间估算相结合,可以获得土壤层的水源涵养过程(此时采样点应为土壤层底部水分,而非流域出口径流),进一步与基于氢氧同位素的水分来源识别相结合,可揭示土壤层涵养的水分供给植物吸收利用和补给河道径流的组分,从而赋予水源涵养更加明确和丰富的内涵与意义。

下垫面渗透性既影响流域水源涵养能力,又影响流域水源涵养过程,因此水源涵养能力与过程在内涵上具有一定关联。但这一关联可能受景观格局或者土地利用结构等因素影响^[74-76]。不同土地利用类型通常具有不同的水源涵养能力,但流域水源涵养过程是土地利用结构的综合体现,无法通过某一土地利用类型表征。应用氢氧同位素技术估算 MRT,可将水源涵养能力估算与水源涵养过程刻画相结合,结合水分来源识别,可将水源涵养能力、过程、作用的刻画相结合,使水源涵养研究从量的估算向过程、内涵的刻画迈进一步,对于科学评估生态系统水源涵养服务具有重要意义。

4.3 基于氢氧同位素刻画水源涵养的尺度性

基于氢氧同位素技术刻画水源涵养过程有其尺度适用性。空间尺度上,水分平均滞留时间的估算方法决定着其水源涵养刻画限定在坡面或流域尺度,流域面积多在 0.01—100 km²之间^[36, 77]。这一空间范围是由水分平均滞留时间估算方法的原理决定的,由公式 2 可知,平均滞留时间估算以流域降水与径流氢氧同位素季节变化模拟为前提,当流域面积过小,这一季节变化容易被降雨干扰,拟合函数难以反映降水与径流同位素季节变化的差异。当流域面积过大,水分滞留时间过长,导致拟合函数难以有效模拟,这不仅限制了应用的空间尺度,同时还限制了时间尺度。

时间尺度上,基于氢氧同位素估算的 MRT 的理论基础(公式 3)是降水与径流同位素的回归函数振幅差异,其应用至少需要一年的同位素变化序列,因此估算的也是年水源涵养量。由于基于氢氧同位素估算 MRT 的基础是回归函数振幅的差异,那么随着 MRT 的增长,振幅差异会越来越小直至难以通过回归函数有效模拟,因此基于氢氧同位素估算 MRT 通常存在应用上限。应用¹⁸O 估算的 MRT 通常在 5a 以下,因为更长的水分滞留时间导致难以观测到¹⁸O 同位素的周期变化^[24, 36]。而³H 具有更长的半衰期(12.32a),因此应用³H 估算 MRT 的应用上限可以与其半衰期相当^[36, 43],但³H 在降雨中含量较低,因此在应用时也要考虑实际检测精度。

5 总结与展望

稳定同位素技术广泛应用于流域水文过程的刻画,在水源涵养研究从静态向动态方向转变的过程中,迫切需要基于氢氧同位素技术的水源涵养研究框架。以氢氧同位素示踪技术为基础,从水分平均滞留时间估算和水分来源识别两个方面,引出了水源涵养过程刻画、能力估算及作用解析三个方面,总结了基于氢氧同位素技术的流域水源涵养研究框架,并分析了其在时间、空间尺度上的适用性,辨析了水源涵养过程、能力和作用三方面相结合的可能性,最后与传统水源涵养方法做了比较。总体上,应用氢氧同位素技术的水源涵养研究优势在于水源涵养过程和蓝绿作用的刻画,有助于水源涵养过程、能力和作用综合分析,为传统水源涵养研究提供了新的视角。

水源涵养研究在逐步从能力估算向过程刻画、作用解析转变,氢氧同位素示踪技术为这一转变提供了可能性,使流域水源涵养的内涵更加丰富和明确。传统水源涵养能力估算方法为基于氢氧同位素技术的水源涵养研究提供了必要基础,同位素技术为水源涵养研究的拓展提供了新的思路和方法。未来应用氢氧同位素的水源涵养研究可能的发展方向包括:(1)单一方法向多方法结合转变:如同位素技术与蓄水能力法相结合,解

析土壤层的水源涵养能力及生态效益、价值;(2)水源涵养单一方面刻画向多方面刻画转变:在水源涵养研究中,仅仅估算水源涵养量往往是不够的,借助同位素技术理解水源涵养过程及作用,有助于明确水源涵养的内涵及实际意义;(3)水源涵养从静态刻画向动态刻画转变:水源涵养量的估算往往是静态的,一定程度上忽略了生态系统的动态性,基于氢氧同位素技术刻画水源涵养过程、解析水源涵养作用,为准确评估生态系统水源涵养价值提供了可能。

参考文献 (References):

- [1] Hwang T, Band L E, Vose J M, Tague C. Ecosystem processes at the watershed scale: hydrologic vegetation gradient as an indicator for lateral hydrologic connectivity of headwater catchments. *Water Resources Research*, 2012, 48(6): W06514.
- [2] Boggs J L, Sun G. Urbanization alters watershed hydrology in the Piedmont of North Carolina. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 256-264.
- [3] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [4] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 北京市森林生态系统的水源涵养功能. *生态学报*, 2008, 28(11): 5619-5624.
- [5] 高成德, 余新晓. 水源涵养林研究综述. *北京林业大学学报*, 2000, 22(5): 78-82.
- [6] 王保盛, 陈华香, 董政, 祝薇, 邱全毅, 唐立娜. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响. *生态学报*, 2020, 40(2): 484-498.
- [7] Richter D B, Billings S A. 'One physical system': tansley's ecosystem as Earth's critical zone. *New Phytologist*, 2015, 206(3): 900-912.
- [8] Brantley S L, Eissenstat D M, Marshall J A, Godsey S E, Balogh-Brunstad Z, Karwan D L, Papuga S A, Roering J, Dawson T E, Evaristo J, Chadwick O, McDonnell J J, Weathers K C. Reviews and syntheses: on the roles trees play in building and plumbing the critical zone. *Biogeosciences*, 2017, 14(22): 5115-5142.
- [9] Field J P, Breshears D D, Law D J, Villegas J C, López-Hoffman L, Brooks P D, Chorover J, Barron-Gafford G A, Gallery R E, Litvak M E, Lybrand R A, McIntosh J C, Meixner T, Niu G Y, Papuga S A, Pelletier J D, Rasmussen C R, Troch P A. Critical zone services: expanding context, constraints, and currency beyond ecosystem services. *Vadose Zone Journal*, 2015, 14(1): 1-7.
- [10] Lü Y H, Hu J, Fu B J, Harris P, Wu L H, Tong X L, Bai Y F, Comber A J. A framework for the regional critical zone classification: the case of the Chinese Loess Plateau. *National Science Review*, 2019, 6(1): 14-18.
- [11] 邓文平, 余新晓, 贾国栋, 李亚军, 刘玉洁. 北京西山鹫峰地区氢氧稳定同位素特征分析. *水科学进展*, 2013, 24(5): 642-650.
- [12] 吕斯丹, 宋贤威, 温学发. 降水与土壤水混合过程的生态水文分离现象及其研究进展. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 1797-1806.
- [13] Good S P, Noone D, Bowen G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science*, 2015, 349(6244): 175-177.
- [14] Kendall C, McDonnell J J. *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [15] 巩国丽, 陈辉, 段德玉. 利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水来源的方法比较. *生态学报*, 2011, 31(24): 7533-7541.
- [16] 冯建祥, 黄敏敏, 黄茜, 郭婕敏, 林光辉. 稳定同位素在滨海湿地生态系统研究中的应用现状与前景. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 1065-1074.
- [17] Brooks J R, Barnard H R, Coulombe R, McDonnell J J. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 100-104.
- [18] Buttle J M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1994, 18(1): 16-41.
- [19] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [20] Sprenger M, Seeger S, Blume T, Weiler M. Travel times in the vadose zone: variability in space and time. *Water Resources Research*, 2016, 52(8): 5727-5754.
- [21] 吴锦奎, 杨洪越, 叶柏生, 丁永建, 魏智. 同位素技术在流域水文研究中的重要进展. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 1024-1032.
- [22] Klaus J, McDonnell J J. Hydrograph separation using stable isotopes: review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 2013, 505: 47-64.
- [23] Rodgers P, Soulsby C, Waldron S, Tetzlaff D. Using stable isotope tracers to assess hydrological flow paths, residence times and landscape influences in a nested mesoscale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(3): 139-155.
- [24] Tetzlaff D, Birkel C, Dick J, Geris J, Soulsby C. Storage dynamics in hydrogeological units control hillslope connectivity, runoff generation, and the evolution of catchment transit time distributions. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 969-985.
- [25] Syed T H, Famiglietti J S, Rodell M, Chen J L, Wilson C R. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS. *Water Resources Research*, 2008, 44(2): W02433.

- [26] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- [27] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2100-2109.
- [28] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [29] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529-534.
- [30] 谢亚军, 谢永宏, 陈心胜, 李峰. 湿地土壤水源涵养功能研究进展. 湿地科学, 2012, 10(1): 109-115.
- [31] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [32] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [33] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, Jackson A L. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. *PLoS One*, 2010, 5(3): e9672.
- [34] Gazis C, Feng X H. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, 2004, 119(1/2): 97-111.
- [35] West J B, Bowen G J, Cerling T E, Ehleringer J R. Stable isotopes as one of nature's ecological recorders. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(7): 408-414.
- [36] McGuire K, McDonnell J J, Weiler M, Kendall C, McGlynn B L, Welker J M, Seibert J. The role of topography on catchment - scale water residence time. *Water Resources Research*, 2005, 41(5): W05002.
- [37] McGuire K J, DeWalle D R, Gburek W J. Evaluation of mean residence time in subsurface waters using oxygen-18 fluctuations during drought conditions in the mid-Appalachians. *Journal of Hydrology*, 2002, 261(1/4): 132-149.
- [38] Soulsby C, Tetzlaff D. Towards simple approaches for mean residence time estimation in ungauged basins using tracers and soil distributions. *Journal of Hydrology*, 2008, 363(1/4): 60-74.
- [39] Katsuyama M, Tani M, Nishimoto S. Connection between streamwater mean residence time and bedrock groundwater recharge/discharge dynamics in weathered granite catchments. *Hydrological Processes*, 2010, 24(16): 2287-2299.
- [40] Lee K S, Kim J M, Lee D R, Kim Y, Lee D. Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes. *Journal of Hydrology*, 2007, 345(3/4): 199-211.
- [41] 刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 梁忠民, 贺瑞敏. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展. 水科学进展, 2019, 30(1): 112-122.
- [42] Maxwell R M, Condon L E, Kollet S J, Maher K, Haggerty R, Forrester M M. The imprint of climate and geology on the residence times of groundwater. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(2): 701-708.
- [43] Stewart M K, Morgenstern U, McDonnell J J. Truncation of stream residence time: how the use of stable isotopes has skewed our concept of streamwater age and origin. *Hydrological Processes*, 2010, 24(12): 1646-1659.
- [44] Howcroft W, Cartwright I, Morgenstern U. Mean transit times in headwater catchments: insights from the Otway Ranges, Australia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(1): 635-653.
- [45] McGuire K J, McDonnell J J. A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology*, 2006, 330(3/4): 543-563.
- [46] McDonnell J J, McGuire K, Aggarwal P, Beven K J, Biondi D, Destouni G, Dunn S, James A, Kirchner J, Kraft P, Lyon S, Maloszewski P, Newman B, Pfister L, Rinaldo A, Rodhe A, Sayama T, Seibert J, Solomon K, Soulsby C, Stewart M, Tetzlaff D, Tobin C, Troch P, Weiler M, Western A, Wörman A, Wrede S. How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. *Hydrological Processes*, 2010, 24(12): 1745-1754.
- [47] Soulsby C, Tetzlaff D, Rodgers P, Dunn S, Waldron S. Runoff processes, stream water residence times and controlling landscape characteristics in a mesoscale catchment: an initial evaluation. *Journal of Hydrology*, 2006, 325(1/4): 197-221.
- [48] Wang J, Lu N, Fu B J. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 685-693.
- [49] Soulsby C, Malcolm R, Helliwell R, Ferrier R C, Jenkins A. Isotope hydrology of the Allt a' Mharcaidh catchment, Cairngorms, Scotland: implications for hydrological pathways and residence times. *Hydrological Processes*, 2000, 14(4): 747-762.
- [50] Dewalle D R, Edwards P J, Swistock B R, Aravena R, Drimmie R J. Seasonal isotope hydrology of three Appalachian forest catchments. *Hydrological Processes*, 1997, 11(15): 1895-1906.
- [51] Rodgers P, Soulsby C, Waldron S. Stable isotope tracers as diagnostic tools in upscaling flow path understanding and residence time estimates in a mountainous mesoscale catchment. *Hydrological Processes*, 2005, 19(11): 2291-2307.
- [52] Hale V C, McDonnell J J. Effect of bedrock permeability on stream base flow mean transit time scaling relations: 1. A multiscale catchment intercomparison. *Water Resources Research*, 2016, 52(2): 1358-1374.
- [53] 杨大文, 雷慧闯, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述. 水利学报, 2010, 41(10): 1142-1149.
- [54] Dawson T E. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 1993, 95(4): 565-574.

- [55] Neumann R B, Cardon Z G. The magnitude of hydraulic redistribution by plant roots: a review and synthesis of empirical and modeling studies. *New Phytologist*, 2012, 194(2): 337-352.
- [56] Sun L, Yang L, Chen L D, Zhao F K, Li S J. Hydraulic redistribution and its contribution to water retention during short-term drought in the summer rainy season in a humid area. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 377-385.
- [57] Sun L, Yang L, Chen L D, Yen H, Zhao F K, Li S J. Evaluation of seasonal patterns of hydraulic redistribution in a humid subtropical area, East China. *Hydrological Processes*, 2020, 34(4): 1052-1062.
- [58] Soulsby C, Tetzlaff D, Hrachowitz M. Tracers and transit times: windows for viewing catchment scale storage? *Hydrological Processes*, 2009, 23(24): 3503-3507.
- [59] Li S G, Romero-Saltos H, Tsujimura M, Sugimoto A, Sasaki L, Davaa G, Oyunbaatar D. Plant water sources in the cold semiarid ecosystem of the upper Kherlen River catchment in Mongolia: a stable isotope approach. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(1): 109-117.
- [60] Gaines K P, Stanley J W, Meinzer F C, McCulloh K A, Woodruff D R, Chen W L, Adams T S, Lin H, Eissenstat D M, Phillips N. Reliance on shallow soil water in a mixed-hardwood forest in central Pennsylvania. *Tree Physiology*, 2016, 36(4): 444-458.
- [61] McCole A A, Stern L A. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water. *Journal of Hydrology*, 2007, 342(3/4): 238-248.
- [62] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, Tan W, Deng P Y, Yang J. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolostone outcrops and nearby thin soils in subtropical China. *Plant and Soil*, 2011, 341(1/2): 399-412.
- [63] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in karst region of Southwest China. *Journal of Hydrology*, 2012, 420-421: 264-274.
- [64] Wang J, Fu B J, Lu N, Zhang L. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 27-37.
- [65] Barbata A, Peñuelas J. Relative contribution of groundwater to plant transpiration estimated with stable isotopes. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10580.
- [66] Zhao P, Tang X Y, Zhao P, Wang C, Tang J L. Identifying the water source for subsurface flow with deuterium and oxygen-18 isotopes of soil water collected from tension lysimeters and cores. *Journal of Hydrology*, 2013, 503: 1-10.
- [67] Oshun J, Dietrich W E, Dawson T E, Fung I. Dynamic, structured heterogeneity of water isotopes inside hillslopes. *Water Resources Research*, 2016, 52(1): 164-189.
- [68] Hu K, Chen H S, Nie Y P, Wang K L. Seasonal recharge and mean residence times of soil and epikarst water in a small karst catchment of southwest China. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10215.
- [69] Onda Y, Tsujimura M, Fujihara J I, Ito J. Runoff generation mechanisms in high-relief mountainous watersheds with different underlying geology. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(3/4): 659-673.
- [70] Pearce A J. Streamflow generation processes: an austral view. *Water Resources Research*, 1990, 26(12): 3037-3047.
- [71] James A L, Roulet N T. Antecedent moisture conditions and catchment morphology as controls on spatial patterns of runoff generation in small forest catchments. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(3/4): 351-366.
- [72] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 盖力强. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究. *自然资源学报*, 2010, 25(4): 585-593.
- [73] 张灿强, 李文华, 张彪, 杨艳刚, 董敦义, 潘春霞. 基于土壤动态蓄水的森林水源涵养能力计量及其空间差异. *自然资源学报*, 2012, 27(4): 697-704.
- [74] Didszun J, Uhlenbrook S. Scaling of dominant runoff generation processes: nested catchments approach using multiple tracers. *Water Resources Research*, 2008, 44(2): W02410.
- [75] Laudon H, Sjöblom V, Buffam I, Seibert J, Mörth M. The role of catchment scale and landscape characteristics for runoff generation of boreal streams. *Journal of Hydrology*, 2007, 344(3/4): 198-209.
- [76] Segura C, James A L, Lazzati D, Roulet N T. Scaling relationships for event water contributions and transit times in small-forested catchments in Eastern Quebec. *Water Resources Research*, 2012, 48(7): W07502.
- [77] Hrachowitz M, Soulsby C, Tetzlaff D, Dawson J J C, Malcolm I A. Regionalization of transit time estimates in montane catchments by integrating landscape controls. *Water Resources Research*, 2009, 45(5): W05421.