

“两水世界”假说的研究进展与未来展望

杨浩林¹ 赵英^{1*} 胡秋丽¹ Jeffrey John MCDONNELL^{1,2}

¹鲁东大学水利土木学院, 山东烟台 264025; ²Global Institute for Water Security, University of Saskatchewan, Saskatoon S7N 3H5, Canada

摘要 近年来, 随着稳定同位素技术、原位监测设备以及土壤水提取方法的持续改进, 生态水文学对“生态水文分离”现象的认识显著深化: 植物与径流往往分别取自束缚水与自由水两个功能不同的土壤水库。该文系统回顾了“两水世界”假说的发展脉络, 并结合最新研究成果, 详细综述了该假说在小流域实验、跨尺度分析及跨生态系统比较研究中的最新进展。文章系统归纳了降水入渗后土壤中束缚水与自由水的形成机制、时空动态以及两者之间一定程度的连通性; 同时讨论了植物水源判识、土壤水采样技术标准化和生态水文模型构建中面临的关键问题。基于最新高频观测与提取技术, 该文提出未来研究方向, 包括深入揭示植物吸水机理、改进同位素在线监测方法、建立多尺度耦合模型以及开展不同气候和植被条件下的对比研究。期望更准确评估植被用水与径流形成的耦合关系, 为生态恢复与流域管理提供过程可解释的依据。

关键词 生态水文分离; 两水世界假说; 缚水; 自由水; 稳定同位素; 植物水源判识

杨浩林, 赵英, 胡秋丽, McDonnell JJ (2025). “两水世界”假说的研究进展与未来展望. 植物生态学报, 49, 1344-1362. DOI: 10.17521/cjpe.2025.0070

“Two water worlds” hypothesis: advances and future prospects

YANG Hao-Lin¹, ZHAO Ying^{1*}, HU Qiu-Li¹, and Jeffrey John MCDONNELL^{1,2}

¹School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China; and ²Global Institute for Water Security, University of Saskatchewan, Saskatoon S7N 3H5, Canada

Abstract

Recent advances in stable isotope techniques, *in-situ* monitoring devices, and soil water extraction methods have increasingly supported the ecohydrological separation phenomenon: plants and streams appear to use water from different soil reservoirs and return it to the hydrosphere. This review summarizes the evolution of the “Two water worlds” (TWW) hypothesis since its initial proposal and discusses the latest research progress, particularly in small-scale field experiments, cross-scale analyses, and cross-ecosystem comparisons. We systematically review the mechanisms and spatiotemporal dynamics underlying the separation of bound water and mobile water in the soil. We also discuss the connectivity between these water pools under various environmental conditions. Key issues, including identifying plant water source, standardizing soil water sampling methods, and addressing model uncertainty, are examined. Future research should focus on investigating plant water uptake mechanisms, improving water stable isotope monitoring techniques, integrating ecohydrological separation processes into hydrological models, and conducting cross-regional comparative studies. This study seeks to improve the accuracy of assessing the coupling between vegetation water use and runoff formation, offering a process-interpretable basis for ecological restoration and watershed management.

Key words ecohydrological separation; “Two water worlds” hypothesis; bound water; mobile water; stable isotope; plant water source identification

Yang HL, Zhao Y, Hu QL, McDonnell JJ (2025). “Two water worlds” hypothesis: advances and future prospects. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 49, 1344-1362. DOI: 10.17521/cjpe.2025.0070

陆地生态系统中, 降水在土壤—植被—径流间的分配一直是水文学和生态学关注的核心问题。传统的水文理论假设降水进入土壤后与土壤中原有水充分混合, 并以平流或壤中流形式向下迁移, 补给

地下水和河川(Bates & Henry, 1928; Hewlett & Hibbert, 1967)。这种“新水置换旧水”的假设在很长一段时间内成为陆地水循环理论的基石。然而, 近年来越来越多的实验证据表明, 降水进入土壤后,

收稿日期Received: 2025-02-26 接受日期Accepted: 2025-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(W2541025)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (W2541025).

* 通信作者Corresponding author (yzhaosoils@gmail.com)

水分并非均匀混合，而是分化为两种截然不同的水库：一部分与土壤基质紧密结合，难以自由移动，主要供植物吸收利用(束缚水)；另一部分则较易移动，容易形成径流或直接蒸发(自由水) (McDonnell, 2014; Evaristo et al., 2015; Good et al., 2015)。这一现象被称为生态水文分离，其理论外化即“两水世界”假说(Phillips, 2010; Renée Brooks et al., 2010)。

“两水世界”假说提出后，在不同区域和尺度的研究中得到了大量检验和讨论。Nehemy等(2021)通过高频数据证明了植物水分利用的动态变化对生态水文分离的影响，Sprenger等(2019)深入讨论了生态系统中不同水库的水龄特征，Penna等(2018)系统总结了近年来稳定同位素技术在生态水文分离研究中遇到的挑战与新机遇，这些研究均为生态水文分离的研究提供了关键支持。野外观测显示，在干旱季节或降雨事件后，土壤中确实存在束缚水与自由水的分层，植物茎干水的同位素值往往偏向于束缚水，而与同期径流水存在明显差异(McDonnell, 2014; Evaristo et al., 2015)。全球尺度的分析进一步表明，植物蒸腾水相对于总陆地蒸散的比例约占64%，而且土壤束缚水与自由水之间发生交换的水量平均仅约为38% (Good et al., 2015)。这些结果表明在许多情况下，土壤中相当一部分水分被生态系统截留并经蒸腾返回大气，而未直接补给河川(Schlesinger & Jasechko, 2014)。这一观点对于水资源管理和生态水文学具有重要意义：如果植物利用的水原本并不会形成径流，那么植被对流域水文的影响需要重新审视。同时，该假说也提出了新的科学问题，例如：束缚水与自由水为何不完全混合？植物为何偏好束缚水？两类水库在何种条件下发生交换？这些关键科学问题目前尚无定论，需要深入研究。

综上，“两水世界”假说作为生态水文学领域的新兴概念，挑战了传统理论并引发了广泛关注，对于深化我们对植物-土壤-水文过程的认识具有重要科学意义，也为森林管理、农业灌溉和生态恢复提供了新的视角。然而，该领域研究仍存在诸多不足：例如概念内涵与机理尚不清晰，方法技术存在偏差及争议，模型表征与实际不符，以及不同生态系统条件下结论不一致等。为此，本文在梳理“两水世界”假说提出背景与基本内涵的基础上，系统综述其关键机制、实验证据、方法学进展、典型生态系统研究以及争议，并结合最新文献讨论未来研究方

向与生态意义。旨在通过这一综述加深对“两水世界”假说的全面理解，明确当前研究的不足与机遇，为今后相关研究提供参考。

1 “两水世界”假说的提出背景与基本内涵

1.1 “两水世界”假说的缘起与发展历程

20世纪末期，Renée Brooks等(2010)在美国俄勒冈一个 10 hm^2 森林流域利用氢、氧稳定同位素追踪降水去向时，发现降雨入渗后土壤中存在两种同位素组成各异的土壤水：一种水的同位素特征接近近期降水，随时间衰减很快；另一种水的同位素比率则明显偏离降水且变化缓慢。前者被视为易移动的“自由水(mobile water)”，主要通过壤中快速径流路径流走；后者则为被土壤基质牢固吸附的“束缚水(bound water)”，滞留时间长且成为植物可利用的水源。Phillips (2010)在评述这项发现时，将这两类水库比喻为彼此独立的“两水世界”，暗示它们在土壤中几乎互不沟通。McDonnell (2014)在此基础上进一步总结提出：降水进入土壤后会分化为紧密结合于土壤基质的水(供植物使用)和较易流动汇入径流的水，二者在水力上和同位素上均保持相对独立。这一假说实质上揭示的是生态水文分离现象，即植被用水与地表径流补给水在来源上发生分离。

自2010年提出以来，“两水世界”假说迅速引起学界关注。McDonnell (2014)探讨了多地区的观测支持该假说，并指出这对构建新一代水文模型具有重要意义。Evaristo等(2015)利用全球47个流域的同位素和水量数据，定量分离了全球陆地蒸散发中植物蒸腾与其他蒸发的比例，并提出lc-excess (line-conditioned excess)指标衡量土壤两水库的分离程度。几乎同时，Good等(2015)基于全球水文同位素模型计算出束缚水与自由水之间平均约有38%的水交换，提示两者并非绝对隔离。在概念拓展方面，Phillips (2010)提出可以将“两水世界”视为陆地“绿水”(即植被、土壤蒸散发的水)与“蓝水”(即河湖水及地下水)二元分隔的微观体现，而Sprenger等(2019)则针对这一假说设计多种假设进行验证，探索不同条件下分离现象的具体形式。总体而言，过去十余年中围绕该假说的研究既包括支持其普遍存在的证据，也出现了质疑和修正其适用性的情况。这一过程中，新技术的发展和多学科的介入也不断丰富和深化着“两水世界”假说的内涵。

1.2 基本内涵与定义

根据“两水世界”假说，土壤水可划分为束缚水和自由水两大类，其区分并非基于化学成分不同，而是基于水力学行为和生态功能的差异。束缚水通常指被土壤毛管力和基质吸附力紧紧保持的水分，存在于土壤微孔隙或胶体表面，具有较低的势能（基质势常低于-1至-3 MPa）而不易自由流动。这些水往往滞留时间长，逐渐与周围土壤和大气达到局部平衡，并为植物根系提供稳定的水源。相反，自由水是指土壤中相对易于运动的水分，主要存在于较大孔隙中，基质势较高（接近饱和）且在降雨时迅速形成重力下渗或沿径流路径移动。自由水通常在降水事件过程中被快速输出土壤剖面，成为壤中径流或补给地下水和河流的“新水”。需要强调的是，这两类水并非完全不发生混合——它们可以看作土壤水的两个端元，之间存在一个连续谱。当土壤含水量较高、降雨强度较大时，自由水所占比例增加，而在土壤干燥或降雨微弱时，束缚水占主导。因此，“两水世界”更准确地应描述为土壤中存在两个类型的水库：一个以植物利用为主，另一个以径流输送为主，中间状态取决于环境条件（Good et al., 2015；

吕斯丹等, 2019）。

1.3 概念模型及其与传统概念的区别

为直观展示“两水世界”假说，研究者构建了多种概念模型。例如，图1展示了两个典型的小流域中降水入渗后的同位素混合空间：图1A代表高流动性水混合区，其同位素值接近降水；图1B代表低流动性水混合区，其同位素值较为稳定，与降水存在偏差。通过对树木茎干水、土壤溶液与降水的同位素值，能够清楚地看出植物吸收的水更接近束缚水的信号，而自由水则参与径流形成（Renée Brooks et al., 2010; Phillips, 2010）。这一系列实验数据为“两水世界”假说提供了有力的实证支持，同时也揭示了土壤中水分在进入径流前并非完全混合的事实。

在传统水文模型中，假定土壤水在尺度上是均匀混合的，一个土壤单元里的水可视为一个整体参与蒸散和径流。然而“两水世界”假说挑战了这一认识，强调土壤水的空间异质性和功能分区。这一概念与土壤物理学中“移动-非移动水域”的思想有相通之处。例如，土壤科学家早已认识到土壤中存在快流域和慢流域：快流域对应大孔隙优先流，慢流域则是基质中缓慢流动或几乎静止的水。但传统观

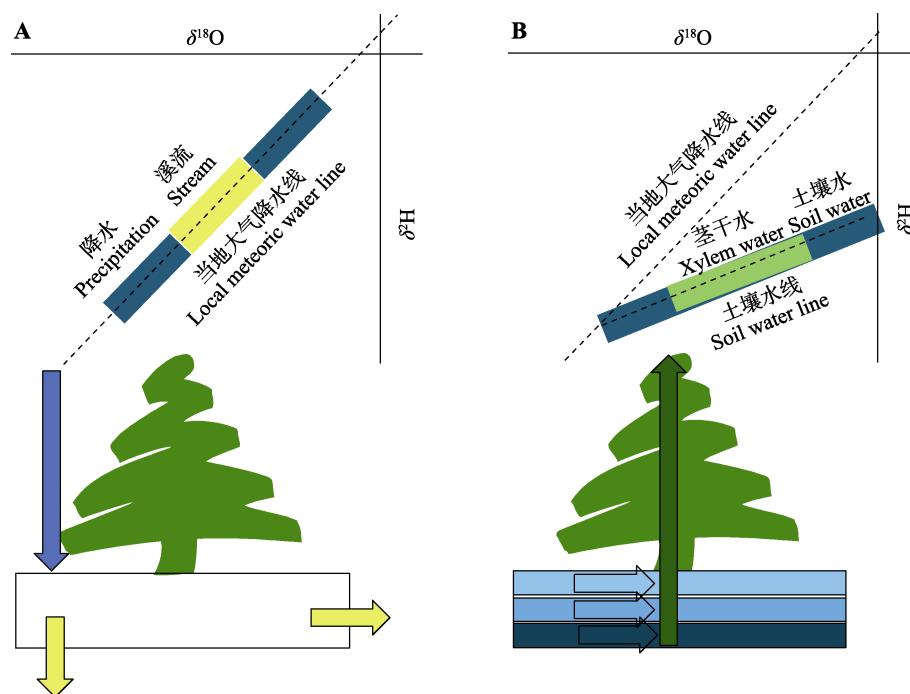


图1 两水世界假说示意图(改编自Goldsmith等(2012)和McDonnell (2014))。**A**, 高流动性水混合空间。**B**, 低流动性水混合空间。 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为样品的氢氧同位素比值相对于标准物质同位素比值的千分差。

Fig. 1 Schematic diagram of the two-water world hypothesis with mobile water mixing space (**A**) and low mobility water mixing space (**B**) (adapted from Goldsmith et al. (2012) and McDonnell (2014)). $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ represent the stable hydrogen and oxygen isotope ratios corresponding to the international isotope ratio standard V-SMOW.

点往往假设在较长时间尺度上两者会逐渐混合均匀(Horton & Hawkins, 1965)。相较而言，“两水世界”假说基于稳定同位素的证据表明，在相当长的时间内(从一次降雨事件的后期到季节尺度)，这两个水库仍可保持稳定同位素的分异而非完全混合。这意味着土壤中存在持久的同位素不均衡：束缚水的同位素组成往往与历史降水或经蒸发富集的信号相关，而自由水则更接近当前降水的信号。例如，有研究通过控制土壤基质势证明，当土壤基质吸力低于 -2.5 MPa 时，土壤束缚水的氢氧同位素比周围总体土壤水偏重，二者显著失衡(Vargas et al., 2017)。这些发现从本质上反映出，两类水库在土壤中受到不同物理作用力控制，从而具备不同的“水龄”和化学指纹。

2 关键机制辨析

“两水世界”假说背后的机理涉及水分在土壤-植物系统中的分布和传输过程，以及同位素分馏等物理化学效应。以下从土壤水分分区、同位素差异、根系吸水选择及蒸发分馏几个方面，对其关键机制进行解析。

2.1 土壤中束缚水与自由水的形成与分区

当降水进入土壤，水分在土壤孔隙中经历再分配：一部分迅速向下渗透，充填大孔隙或形成沿根道、裂隙的优先流，这部分水分几乎未受土壤基质束缚，即构成自由水。另一部分则被土壤颗粒和微细孔隙强力吸附并滞留，成为束缚水(图2)。形成这两种水库的主要驱动力在于土壤孔隙和基质势的异质性：土壤的大孔隙结构(如生物孔道、裂隙)允许水在重力作用下快速通过，典型入渗速率可高达每小时数百mm；而微孔隙中的毛管力则可在短时间内将水紧紧保持在土壤颗粒表面，对应基质吸力常超过数MPa，使水分难以移动。因此，在一次强降雨事件中，先期降雨很快形成壤中快速流流出流域，其同位素保持降雨信号，而后续降雨逐渐被土壤基质吸附，留存在土壤中成为植物水源。这种过程解释了为什么土壤束缚水的同位素信号往往滞后且不同于当前降水。在多孔隙介质中，自由水主要占据连通性好的孔隙网络并在降雨停止后继续排出，而束缚水则留存在非连通或死端微孔中(Beven & Germann, 1982; Sprenger et al., 2019)。同时，由于土

壤不同深度孔隙结构差异，束缚水一般分布在中深层并缓慢向下补给深层土壤，时间尺度上可能支撑植物整个干季的蒸腾需求。总地来说，土壤结构和入渗强度是决定束缚水与自由水分区的关键因素：结构越宏观连通，降水越急骤，则自由水比例越高；反之，黏粒含量高、孔隙度小的土壤或小雨更容易形成高比例的束缚水。

除了孔隙大小外，土壤初始含水状态也影响分区结果：在干燥土壤中，初始基质吸力大，降水首先补给束缚水库(被干燥土壤吸收)，只有当土壤湿度逐渐提高、大孔隙产生连通渗漏时，才有自由水形成。这意味着在长期干旱后的首次降雨，土壤多以恢复束缚水为主，几乎无径流产生；而在前期湿润条件下，再降水更容易形成自由水径流。Finkenbiner等(2022)的模拟研究支持这一点：土壤初始湿度、降雨强度等因素都会显著影响两类水库的相对比例。在其650种情景模拟中，干燥条件下即使小雨也加强了束缚水与自由水的分离效应，而饱和初始条件下即便中等降雨也可能出现较高混合。特别是降雨强度被发现是驱动水分分离的重要因素：Radolinski等(2021)的土柱实验表明，只有在降雨强度高达 $110\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的极端情况下，不同水库才保持明显的同位素分异；而降雨强度中低时，土壤水与新雨水几乎完全混合。可见，“两水世界”现象并非普遍存在于所有条件，而是需要一定的水力触发条件，如降水脉冲强、土壤孔隙明显以及土壤干湿分层等。理解这些形成机制有助于我们预判在哪些情境下生态水文分离会更加显著。

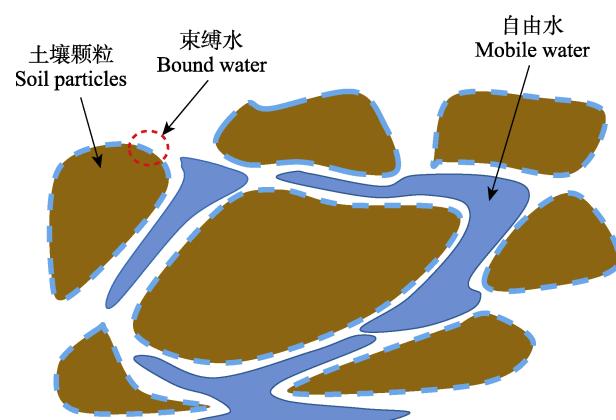


图2 土壤束缚水和自由水分区图。

Fig. 2 Diagram of bound water and mobile water in soil.

2.2 束缚水与自由水的稳定同位素分布差异

稳定同位素(氢的 $\delta^2\text{H}$ 和氧的 $\delta^{18}\text{O}$)作为水源示踪的“指纹”,在“两水世界”研究中发挥了关键作用。观测发现,土壤束缚水与自由水经常表现出系统性的同位素差异:束缚水往往相对富集重同位素,而自由水则更接近近期降水的原始同位素比值(李裕红等,2020)。造成这一差异的主要原因包括蒸发分馏和水源时间滞后两个方面。

首先,土壤蒸发分馏导致残留土壤水变重。地表土层的水在蒸发过程中,较轻的 H_2^{16}O 优先进入气相,残留水中重同位素(^2H 、 ^{18}O)比例升高。这种蒸发富集效应沿土壤剖面向下递减,上层土壤束缚水最为富集,而深层土壤接近未蒸发的降水值(Benettin et al., 2018)。降雨事件后,新的自由水主要沿大孔隙渗漏并很快离开表层,因此不易受到显著蒸发影响,保持了近似雨水的轻同位素特征。相反,束缚水特别是表层束缚水则在降雨间隔期持续受到蒸发影响。同位素的深度剖面数据显示,干季时0–10 cm土壤水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 比深层重许多,到雨季初始的小雨也不足以完全混合稀释这种梯度,因此深层束缚水相对维持了重同位素偏差。不过,需要注意在降雨频繁的湿润环境中,上层蒸发富集会被频繁雨水冲刷减弱,因此湿润气候下束缚水和自由水的同位素差异可能主要体现为不同“水龄”的降水信号,而非强烈蒸发所致。

其次,水源时间滞后使束缚水携带历史降水信号(von Freyberg et al., 2020)。束缚水留存土壤时间长,可累积多场降水的混合作用,其同位素组成往往接近较早时期降水的平均值,而自由水则偏向当前降水事件的值。在季风区或地中海气候区,雨季初期降水的同位素常偏重(受干季蒸发或海洋源水变化影响),雨季后期降水同位素组成变轻。如果土壤束缚水主要来自雨季初期,那么到了雨季末植物利用水的同位素仍显著重于当期降水,这种滞后反映了土壤水库对降水输入的累积效应。同样,在温带地区冬季降雪融水和春季降雨的同位素组成不同,深层束缚水可能保留了前一季的雪融水信号,而夏季的新雨则形成径流。由此产生植物水和径流水之间的同位素解耦。此外,自由水往往来自降雨事件的前段:降雨开始时同位素比值可能由于“雨量效应”较重(降雨量小时,同位素重),随着降雨持续同位素变轻。因此自由水的同位素可能偏向事件中后

段水的值,而束缚水包括了事件全程甚至多事件的混合。Good等(2015)通过模型定量证实,土壤中束缚水与自由水存在不完全混合时,会在对流层降水线(d-excess等指标)上产生系统性偏移。因此,同位素差异是“两水世界”现象的直接体现,也是辨识束缚水与自由水的重要依据,但需要结合具体过程加以解释。

2.3 根系吸水选择性与同位素分馏

植物根系从何种水库取水是“两水世界”假说的核心命题之一。传统观点认为,土壤中的水在被植物利用时不发生同位素分馏,即植物茎液的同位素组成反映其实际水源(Ehleringer & Dawson, 1992)。但近年来的研究发现,根系吸水本身可能存在选择性甚至同位素分馏,这会影响对植物水源的判断(Lin & da S L Sternberg, 1993; de la Casa et al., 2022)。

首先,根系吸水的时空选择性使植物偏向特定水库。植物根系在土壤中并非均匀分布,也具有对水势梯度的响应能力。当表层土壤水分充足时,浅根系可以利用近期降水(自由水);但在干旱条件下,表土干涸、自由水消失,植物会加大对深层束缚水的依赖。许多干旱区树种通过深根汲取地下蓄水,在整个干季主要利用深层束缚水,而雨季短暂利用过自由水后又迅速转回深层水源。因此,同一种植物在不同季节可能表现出对两类水库的不同利用倾向。此外,不同植物物种因根系深度和结构差异,也会表现出水源选择的差异。例如,Moreno-Gutiérrez等(2012)发现半干旱森林中浅根草本植物主要利用降雨后形成的表层自由水,而深根木本则更多吸收土壤深层束缚水,从而同域植物间形成水资源分离。这说明植物根系对于可利用水源具有动态适应性:当自由水可得且易取时,部分植物也会利用(特别是浅根植物);而对于深根树木或植物处于旱季时段,则更倾向或不得不依赖束缚水。因此植物偏好束缚水并非主动“选择”更重的同位素水,而是在生态位和水力条件共同作用下形成的表现现象。

其次,根部吸水过程中的同位素分馏近期被提出作为解释植物茎干水异常同位素值的形成机制之一(Lin & da S L Sternberg, 1993)。经典理论假设液态水通过根膜进入木质部不发生显著的氢、氧同位素分馏。然而,越来越多的实验表明,在极端干旱或特定生理条件下,这一假设可能失效。例如,Barbeta

等(2019)在控制实验中发现,当土壤干燥致使植物水分胁迫增大时,树苗木质部水的 $\delta^2\text{H}$ 与土壤水出现显著偏差。Poca等(2019)更直接地证实了菌根共生可能导致根系吸水的同位素差别:他们在温室中培养的菌根共生金合欢(*Acacia caven*)幼苗中测得,茎干水相对水源出现最大达-24.6‰的 $\delta^2\text{H}$ 亏损和-2.9‰的 $\delta^{18}\text{O}$ 亏损。这暗示真菌菌丝在土壤-根系界面吸水时可能产生同位素选择,偏向吸收轻同位素的水或发生氢同位素交换反应,使进入植物的水同位素变轻。此外,Vargas等(2017)对鳄梨(*Persea americana*)树苗的实验也发现,不同土壤类型和水分条件下,其根系吸水对 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均产生了分馏效应。这些发现挑战了对植物水源同位素解析的传统认知。如果植物吸水过程中发生了分馏,那么仅凭茎干水与土壤水同位素差异来推断水源将不再可靠,因为茎干水同位素偏差可能部分源于生理分馏而非真实水源不同。尤其是氢同位素,由于可与有机物中的氢发生交换,更容易在高温真空提取过程中产生偏差或在根际发生同位素交换(Chen et al., 2020)。目前,对根系吸水分馏的认识尚不统一:一些学者认为其影响有限且氧同位素基本不分馏,另一些则指出在干旱胁迫、菌根作用下分馏可能普遍存在(Penna et al., 2018)。总之,根系吸水的选择性与可能的同位素分馏共同影响了植物水源判识的精度,需要在解释“两水世界”现象时加以考虑。

2.4 蒸发分馏与植物生理过程的影响

除了土壤和根系过程,大气蒸发和植物体内水分循环等生理过程也会对“两水世界”现象产生影响,主要体现为同位素组成改变和水库连通性调整。

一方面,蒸腾作用对水同位素具有影响。与土壤蒸发不同,植物根吸收的水在茎叶运输过程中一般不发生同位素分馏,直到水分在叶片气孔中蒸腾时才产生富集(Ehleringer & Dawson, 1992; Brunel et al., 1995)。但叶片蒸腾对整株植物茎干水同位素的反馈作用有限,因为大部分富集发生在叶际,很少有大量富集的水重新回到茎干。不过,在某些情况下,树干储水和再循环可能引起茎干水的同位素变化。例如,落叶植物在休眠期其木质部残留水可能逐渐与植物组织发生氢同位素交换而富集;又如粗枝条中缓慢流动的水在高蒸腾速率下可能富集 ^{18}O 。这些过程造成植物体内水的垂直梯度:树冠上部茎干水同位素可能略不同于下部主干。因此,采样位

置和时间都会影响测得的植物水同位素值,进而影响植物吸水来源判断。如果不加注意,可能将这些体内过程造成的偏差误认为是土壤水库差异。因此,高大树木的茎流延迟、储存效应等应在野外观测和模型中予以考虑(Knighton et al., 2020)。近期研究也强调了树干含水量对同位素动态的缓冲作用:树木本身可被视为一个“水库”,其存储和混合作用会稀释或掩盖来自土壤水源信号的差异。在模型模拟中加入树体水库和混合过程,可更好再现植被水源的同位素动态。

另一方面,土壤-植物-大气的连续体连通可能打破严格的“两水世界”格局。在极端湿润或极端干旱情况下,束缚水与自由水之间可能通过蒸汽相或毛细流产生有限连通。例如,在干旱气候下,深根植物的蒸腾拉力可能将深层土壤的束缚水拉动,通过根系渗漏或土壤毛管水重新分布,从而间接补给部分自由水库。这类似于一种“液流通路”,在一定程度上连接了束缚水和自由水。此外,降雨后的土壤水汽梯度也可能诱导束缚水蒸发再凝结到邻近大孔隙中,补充自由水。同样,土壤裂隙在干湿循环中开合,干旱时束缚水被困于基质,湿润时裂隙闭合又促进部分重新分配。Good等(2015)在全球分析中已指出束缚水与自由水之间约有1/3左右的水量在中长期可以发生交换。因此,真实土壤中两水库并非绝对隔离,而是存在时空上受限的交换过程。理解这些交换的机制(如蒸气扩散、重力返渗等)对于完善“两水世界”理论十分重要。

总地来说,束缚水与自由水区分的关键过程受多尺度影响:土壤结构和入渗动力决定初始分区,同位素的蒸发富集和降水时滞造成两水库同位素组成差异,而根系吸水行为和植物-土壤反馈又会扩大这一差异。正是这些机制共同作用,塑造了在不同环境下观察到的生态水文分离现象。

3 野外观测与实验证据

“两水世界”假说自提出以来,已在不同气候带、不同尺度的野外观测和实验研究中得到检验(Evaristo et al., 2016; Hervé-Fernández et al., 2016; Bowling et al., 2017)。总体而言,大量证据支持在多数情境下存在生态水文分离现象,但其程度与普遍性存在差异(Liu et al., 2020)。本节将分小流域实证、区域/全球分析和控制实验三方面综述主要证据。

3.1 小流域和局地实证研究

最初的“两水世界”证据来自小流域尺度的同位素对比实验。Renée Brooks等(2010)通过对树木茎干水、土壤水以及溪流水的氢氧同位素分析发现：树木茎干水的同位素组成与经低温抽提获得的土壤基质水(束缚水)相符，而明显区别于张力计收集的土壤自由水和溪流水的组成。这一发现提供了直接证据，表明植物吸收的水与形成径流的水来源不同。Phillips (2010)进一步通过绘制双同位素三角图，将植物水点与土壤自由水点进行比较，清晰地呈现出植物水聚类于富集的束缚水一侧，而雨水-径流水聚类于另一侧。在之后的十多年里，类似的方法被应用于各种气候与生态系统的小流域研究中，普遍观察到土壤水的同位素双峰特征和植物对重同位素水的偏向吸收。Goldsmith等(2012)在墨西哥季节性干旱的云雾林，通过多种雨后时段的土-水-植物同位素采样，发现雨季开始时新雨迅速形成壤中流汇出，而树木则持续利用前一个干季残存于土壤中的富集水。同样，赵影(2022)对黄土高原的柠条(*Caragana korshinskii*)和北沙柳(*Salix psammophila*)水分利用的研究表明，天然降雨后深层土壤束缚水的 $\delta^{18}\text{O}$ 较降水滞后且同位素比值偏大，植被茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与深层束缚水吻合，而地表径流水则近似当场降水。这些野外实证巩固了“两水世界”假说的适用性：在从温带森林、热带稀树草原到高原灌丛等多样环境中，只要存在明显的干湿季或降水脉冲，土壤水库都会表现出分层，植物水源与地表径流在同位素上可区分开来。

值得注意的是，不同季节和气候条件下分离现象的强弱有所不同(Allen et al., 2019)。在干旱季节，由于表层土壤水耗尽，植物几乎完全依赖深层束缚水，茎干水与束缚水同位素高度吻合，而溪流则主要由偶发降雨形成的快速自由水补给，二者差异极大。而在雨季或湿润时期，连续降雨可使土壤水重新混合，束缚水库被补充更新，此时植物也可能直接利用部分近期雨水，导致植物水和径流水的同位素差异缩小。在西班牙半干旱林地的观测中，冬季雨后浅层土壤束缚水迅速增多，部分树木的水源会短暂转向浅层，使茎干水信号向降水靠拢。但随着降雨间隔拉长，束缚水与自由水的分异又重新出现(Moreno-Gutiérrez et al., 2012)。总地来说，干旱期和降雨事件刚结束时是观察两水分离的最佳时机，而

在长时段湿润条件下分离效应减弱甚至消失。这提示我们在研究“两水世界”时需考虑时间尺度：短期强降雨事件和长期水文季节交替都会影响植物水源与径流的分离格局。

3.2 流域尺度与全球综合分析

为了评估“两水世界”现象的普遍性，研究者们将视野扩大到更大尺度。Good等(2015)通过全球通量数据，结合水量平衡和同位素模型，估算出植物蒸腾约占全球陆地蒸散的64%，而植物水有相当大部分并未参与径流循环。换句话说，大约60%的陆地降水被植物“截留”在绿水途径中返回大气，只有剩余部分成为蓝水。更引人注目的是，他们通过全局同位素偏差量化了束缚水与自由水的连通程度，结果显示平均约38%的土壤水发生了束缚-自由水库之间的交换。这表明在全球尺度上，尽管生态水文分离普遍存在，但并非绝对隔离，大约1/3的水在土壤中仍然可以由束缚态转为流动态或反之。与此同时，Evaristo等(2016)通过使用lc-excess作为指标来衡量土壤水的分离程度，发现不同气候区呈现出相反的趋势：在干旱区(如年降水量低且蒸发旺盛地区)，lc-excess值显示束缚水与自由水的同位素差异较小，暗示两库联系相对紧密；而在湿润区，土壤水分明显分成两类同位素组成，表明束缚水和自由水高度分离。这一结果似乎与前述干旱季节分离更强的观测相矛盾。可能的解释是：时空尺度差异导致了结论差异。在全球气候尺度上，干旱区植被常年依赖深层水甚至地下水生存，植物水和地下水可能同源，从而提高了水库连通性；而湿润区频繁降水使土壤经常维持两个不同的水库状态，植物可以一直利用束缚水，不需动用径流水源，久而久之两库“各行其道”。相反，在季节和事件尺度上，干旱时期因为表土干燥，短时降雨很难混入深层束缚水，瞬间的自由水与原有束缚水迥异，分离反而最为明显。因此，干旱气候下长时间尺度连通、短时间尺度分离，湿润气候下则长时间尺度分离、短时间尺度混合，这个区别需结合具体研究尺度来分析。

除了这些综合分析，一些大尺度的实地实验也提供了宝贵证据。在苏格兰的多个森林流域，研究者利用降雨-径流同位素延迟现象推断出土壤中存在“双峰”水龄分布——一部分降水迅速流出(自由水)，另一部分长时间滞留(束缚水)，并通过逐次线性库模型证明引入不完全混合才能解释径流同位素

的缓慢响应(Soulsby et al., 2015)。这种“双峰”水龄分布也被认为是“两水世界”在水文响应上的表现形式：径流对降水的响应有一部分来自快速路径(小时到天尺度)，另一部分来自缓慢路径(周、月至多年尺度)。因此，越来越多的大尺度模型开始尝试考虑双水库。例如，最近的一个全球陆面模型区分了“束缚水”和“自由水”，并用观测数据校准两者的交换系数，发现在不增加其他自由参数的情况下模型对蒸散和径流的模拟显著改善(Finkenbinder et al., 2022)。这进一步从宏观角度验证了“两水世界”概念的实用性。

3.3 控制条件下的实验证据

为了深入探究生态水文分离的物理机制，研究者进行了各种室内模拟和野外控制实验。这些实验通常通过严格控制变量(如土壤类型、降雨强度、根系有无等)，量化评估在不同条件下束缚水与自由水的分离程度。Radolinski等(2021)设计了不同结构的土柱并施加不同强度的人工降雨，同时交替改变雨水的同位素，比对流出水和土壤水的同位素动态。结果发现，在低至中等降雨强度(26 和 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)下，无论土壤孔隙多少，降水与土壤水几乎完全混合，表明束缚水库在这些情况下并未保持独立信号；而当降雨强度提高到 $110 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时，土壤结构良好的土柱中出现了明显的不混合作用：雨水沿大孔隙快速下渗，未能充分浸润基质，导致渗漏同位素与初始土壤水出现显著差异。这一实验定量证明了强烈的优先流是形成“两水世界”的必要条件，且一般的降雨事件尚不足以产生完全的水文分离。换言之，在自然界中真正达到“两水世界”极端的情形可能相对少见，需要极端骤雨或特殊土壤结构。进一步，Radolinski等(2025)论证了在未来更高 CO_2 浓度(增加 300 ppm (约为 $549 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$))、升温(增加 3°C)和反复干旱的复合极端气候条件下，土壤水分表现出显著的水文学分离现象：新降水主要通过土壤中的大孔隙快速向下运移，而不与小孔隙中的水分有效混合。这一现象持续超过百天，严重挑战了以往土壤水为均匀混合体的传统理论假设，说明极端气候条件加剧了土壤形成明显的水分“双域结构”，为生态水文分离理论与气候变化条件下的土壤-植物水分利用机制研究提供了重要新视角。

此外，还有实验关注提取方法和根系存在对分离现象的影响。如Sprenger等(2019)比较了有无植物

根系的土柱，同样的降雨处理下，有植物的土柱中表层束缚水的同位素更重且与深层水库分异更明显，推测是植物吸水和蒸腾使表层束缚水库强化了蒸发富集和干湿波动，从而加剧了分离程度。这提示植被本身也是塑造“两水世界”的积极因子，因为无植物的土壤水在降雨后迟早会部分回补深层或混合，而植物持续的抽提作用能使束缚水库更长久地独立存在。另一些盆栽实验则聚焦根系吸水的同位素效应，前述Poca等(2019)和Vargas等(2017)的研究在受控条件下证实了根系吸水分馏可能使茎干水与水源的同位素组成不匹配。虽然这些发现本质上给“两水世界”假说增加了复杂性(即部分茎干水与土壤水同位素组成差异非由水库不同引起)，但同样是关键的实验证据，说明在解释观测到的分离现象时必须谨慎考虑方法和生物因素。总体而言，控制实验为理解“两水世界”提供了独特视角：它们既验证了野外难以分开的因素(如降雨强度、孔隙度)的作用，也揭示了某些之前未被重视的影响因素(如根系吸水分馏)。这些证据有助于将同位素分馏现象的“相关性”归结为“因果性”，为完善理论模型和预测实际情境下分离效应奠定基础。

4 方法学争议与技术演进

由于“两水世界”假说高度依赖稳定同位素方法和土壤水采样技术，方法学本身的局限与创新对研究结论影响重大。本节讨论围绕土壤与植物水取样方法的争议，以及近年来同位素监测和多示踪新技术的发展。

4.1 土壤水分采集与提取方法的偏差

早期的生态水文分离研究发现，不同土壤水取样方法会导致测得的水同位素存在差异。Landon等(1999)比较了多种方法：包括张力计抽提、离心提取、低温真空抽提等，结果显示各方法得到的水样 $\delta^{18}\text{O}$ 彼此并不一致。一般而言，张力计和离心法倾向于提取土壤中自由水，其同位素更接近雨水；而真空抽提则提取出土壤中全部水分，包括胶附在微孔和矿物表面的束缚水，因此往往得到更大的同位素比值。这恰是“两水世界”概念的实验基础：不同方法“看到”的其实是土壤中不同的水库(表1)。然而，如果研究者不加以区分，混用不同方法的数据进行比较，就可能得出伪分离或低估分离的结论。因此，在比较不同研究结果时，必须考虑取样方法差异。

表1 常见土壤水分采集方法

Table 1 Common methods for soil moisture collection

方法 Method	水分类型 Types of water	缺点 Disadvantage
低温真空抽提法 Cryogenic vacuum extraction	土壤中全部水分 All moisture in the soil	真空、加热条件, 存在分馏 The occurrence of isotopic fractionation under vacuum and heating conditions
离心法 Centrifugation	特定吸力下的水分 Water content at a specific suction level	无法提取小孔隙水 Inability to extract water from small soil pores
共沸蒸馏法 Azeotropic distillation	土壤中全部水分 All moisture in the soil	步骤复杂, 存在有机质污染 Complexity in experimental procedure and susceptibility to organic contamination
机械压榨法 Mechanical squeezing	一定压力下的水分 Water content at a given pressure	土壤类型受限, 效率低 Limitations to specific soil types and low extraction efficiency

有学者发现, 相同地点采用张力计采样和直接蒸馏, 所得土壤水 $\delta^2\text{H}$ 可能相差高达10‰以上, 这完全可能超过植被水与径流水之间的差异幅度, 从而影响对“两水世界”假说的判断(Orlowski et al., 2016)。

针对这些偏差问题, 近年来开始强调土壤水取样的标准化。Orlowski等(2018)开展了一项多实验室比对, 将统一土样分发给多家实验室进行不同方法提取, 然后比对结果, 发现低温真空抽提法和氘氚平衡法等得到的同位素值系统性偏差明显, 需根据土壤质地、有机质含量进行修正。Wen等(2023)则通过向土壤样品中添加已知同位素信号的标记水, 利用气推法、离心法、机械压榨法和低温真空抽提法获取土壤水并测定其同位素组成, 以所获取的土壤水与标记水的同位素组成差异, 尝试建立校正公式, 将不同方法得到的结果转换到可比标准上。虽然尚无统一的国际标准, 但这些努力正在量化不同方法的误差来源, 例如: 因为有机氢与水交换, 真空抽提易导致有机质含量高的土壤样品产生氢同位素偏负; 而高温烘干提取可能使轻同位素先逸出导致残余水变重。通过引入这些校正, 我们期望在不同研究之间建立数据可比性。在本综述撰写时, 有些研究者已提议采用基质势分类的取样方案: 即先测定土壤基质吸力, 将土壤水区分为强束缚(>某阈值吸力)和弱束缚两部分, 再分别采样分析。这种思路试图绕过方法偏差, 用物理标准定义“强束缚”和“弱束缚”水库, 为未来一致性分析提供了方向。

4.2 植物茎干水同位素分析的偏差与改进

相较于土壤水, 植物茎干水的取样和同位素测定也存在技术挑战。传统上, 获取茎干水样通常依赖于低温真空抽提法: 将新鲜木质部样品冷冻后在真空中加热, 使其中水汽逸出冷凝收集。这一方法能高效提取大部分结合水, 但近年来发现它可能引入同位素偏差(Zuecco et al., 2022)。Chen等(2020)的

研究指出, 真空抽提对木质部水的氢同位素测定存在系统误差: 提取过程中, 样品内某些有机分子(如纤维素、木质素)中的氢原子会与水分子发生同位素交换, 导致收集到的水中氘含量偏高, 从而与原始植物水存在偏离。他们通过实验校正后发现, 纠正这一偏差后, 早期支持全球生态水文分离的一些数据显著改变, 甚至不再显示出植物水与土壤水的明显差异。这一结果在学界引发反响, 因为它暗示“两水世界”假说在全球尺度上的证据可能被高估了。Evaristo等(2021)和Zhao (2021)认为即使考虑提取偏差, 不同地区植物水与径流水的同位素差仍无法用完全混合作用解释, 仍存在一定程度的分离。这些发现促使许多研究者反思: 我们所观测到的植物水同位素差异中, 有多大部分源自真实水源差异, 又有多大部分可能是方法伪影? 目前倾向的共识是: 真空抽提偏差确实存在且在氢同位素上尤为明显, 但对于典型的生态水文分离案例, 其量级不足以完全消除植物水与自由水的差异, 只是在某些植物茎干水与其水源同位素组成差异不显著的情况下可能改变结论。为保险起见, 越来越多的新技术被用于茎干水的同位素获取。例如, 直接使用离心机压榨茎段水分(适用于多汁茎或新鲜细根)、现场应用直插式探头吸取木质部汁液, 或者采用热解析-在线分析等手段, 减少繁琐提取步骤带来的分馏。文明宜(2022)针对抽提偏差进行了系统研究, 提出根据木质部组织类型和含水率选择最佳提取温度和时间, 以最小化有机氢交换。这些改进对于获取准确的植物水同位素数据至关重要, 也为未来的发展奠定了基础, 如利用原位探针直接测量树干水同位素。

4.3 稳定同位素高频监测与多方法结合

方法学的进展不仅在采样技术, 也体现在监测频率和综合示踪能力的提升上。过去受到仪器限制, 野外同位素采样往往点位稀疏、频率低, 只能提供

模糊的阶段性图景。近年来，随着高分辨率光谱仪的发展，如便携式红外激光水汽同位素分析仪(IRIS)等，研究者可以在现场对水汽进行连续测定，从而推断实时的液态水同位素值(Cui et al., 2017)。Wassenaar等(2008)和Munksgaard等(2012)早期尝试将水汽同位素连续测量应用于野外，记录了降雨事件期间土壤水同位素的分钟级波动。近期更先进的装置结合自动土壤气体通气系统，实现了土壤孔隙水同位素的原位监测，可捕捉降水入渗锋面通过时土壤水同位素的实时变化。这些高频数据揭示出一些以前难以观测的现象：比如降雨初期的“老水释出”使深层土壤气孔中的水汽同位素瞬时变重，随后新水渗入又使其变轻，如此往复，表明了土壤水库之间存在动态交换而非一成不变。除了监测设备本身，还出现了类似SWISS (Soil Water Isotope Storage System)的技术，将连续降水、土壤水、树干液汁样品自动收集并依次导入分析仪，实现多部位的同步监测。高时间分辨率的数据不仅提供了验证模型的“试金石”，也往往带来新的认知。一项对比实验发现，传统人工采样得到的同位素序列可能遗漏短时剧烈变化，导致误判为土壤水同位素平稳，而自动监测揭示实际在雨后几小时内就发生了明显的重新分配过程(Volkmann et al., 2016)。

在多方法结合方面，将稳定同位素与其他水文或地球化学示踪结合，成为提高水源判识可靠性的重要手段。单一的 $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ 示踪有时难以区分某些情形：如深层束缚水与浅层自由水可能同位素相近，但离子浓度迥异。Figueroa-Johnson等(2007)将 Cl^- 浓度纳入分析，发现植物茎干水的 Cl^- 浓度与深层土壤束缚水吻合，从而验证了同位素推断的水源。另一些研究使用惰性染色剂(如溴离子)模拟降雨入渗，结合同位素结果判断哪些根系吸收了经染色的浅层新水、哪些没有。还有人尝试使用硅酸盐同位素或水中溶解有机碳特征作为补充判据，因为束缚水在土壤中停留时间长，能溶解更多二氧化硅和有机质，其化学和同位素组成信号都不同于快速径流的自由水。在寒冷地区，水的三重氧同位素(^{17}O 异常)也被用于区分蒸发影响，因为蒸发过程留下的 ^{17}O 异常信号能帮助识别束缚水经历的蒸发历史(Surma et al., 2021)。通过多参数联合，可以交叉验证不同方法的结论，提高对水源归属的信心。例如，当同位素结果和离子示踪均指向植物水源为深层时，我们就

更确定“两水世界”现象非方法误差导致。未来，这种多示踪综合分析有望成为标准配置，特别是在水源复杂、单一指标难以定论的研究区域。

5 典型生态系统中的研究进展

生态水文分离现象在不同生态系统中的表现并不相同，各系统的气候特征、土壤性质和植被结构都会影响“两水世界”假说的适用性(Gu et al., 2025)。本节选取森林、草地荒漠和农田生态系统3类典型环境，概述相关研究进展与认识。

5.1 森林生态系统

森林是“两水世界”研究的发源地和热点。尤其在地中海型气候(冬季多雨夏季干旱)森林中，分离现象最为典型。Renée Brooks等(2010)的研究地——美国西海岸常绿阔叶林就属于此类气候，干湿季对比强烈，束缚水和自由水在雨季末高度分离。后来在欧洲地中海地区的针阔混交林中的多项研究也证实：夏季树木主要汲取深层残留水(同位素重且稳定)，冬季大量降雨则形成径流，只有少部分被根系截留。这与植被适应干旱的策略有关：深根植物在冬季储存水分于深层土壤或自身组织，供夏季使用。相比之下，温带季风区森林由于降雨集中但旱季不如地中海区极端，也观察到分离现象但程度略弱。中国亚热带森林(如四川盆地)的一项研究表明，雨季植物水与自由水同位素的差异在大雨后会减小，但在几个无雨日后又恢复明显分离，说明在降雨频繁的季风环境下，两水库交替分离-连接(Zhao et al., 2013)。湿润热带雨林的情况更特殊：这里降雨频繁且全年土壤保持高湿度，理论上束缚水与自由水应更连通。Goldsmith等(2012)在墨西哥山区雨林的观测发现，虽然雨季束缚水和自由水有一定区别，但整体上植物在雨季也直接利用相当比例的新水(自由水)，分离不如干季显著。一些在亚马孙的研究进一步指出，在热带雨林深厚土壤里，强降雨足以湿润到几米深，植物根系接触到的大部分都是近期雨水，因此很难划分哪个是“束缚水”(Goldsmith et al., 2012)。不过即便如此，在树冠层和林下植被之间仍存在水源差异：大树可利用更深储水层，小型植物更多取上层土壤快速周转水，从而在群落内部形成类似“两水世界”的分配。总之，森林生态系统中，两水库的分离程度总体与气候干湿季对比直接相关，即干旱季节性越强，分离越明显。

5.2 草原和荒漠生态系统

在草原、稀树草原和荒漠等半干旱生态系统，“两水世界”假说同样受到关注。这类系统特点是年降水量低且变率大，植被稀疏、根系分布浅深各异。一方面，由于降水稀少且多以阵雨形式出现，土壤常年保持干燥深厚的束缚水库，只有暴雨时才形成短暂自由水渗漏。因此，植物生存高度依赖深层束缚水甚至地下水。Moreno-Gutiérrez等(2012)在西班牙东南部半干旱石质草原的研究表明：多种共存植物(包括乔木、灌木和多年生草本)通过差异化的根系深度分别吸收了不同土层的土壤水，其中深根的乔木汲取稳定的深层束缚水，而浅根草本仅利用雨后表层自由水，避免了直接竞争。这种“水分利用分隔”正是生态水文分离在群落尺度的体现。另一方面，在更加干旱的荒漠地区(如撒哈拉边缘、我国西北部荒漠)，植物稀少但根系极深，可达地下水或稳定深层水库(Chen et al., 2014; Xu et al., 2024)。这时束缚水与自由水的界限可能发生改变：土壤中长年几乎没有束缚水存在(来源于深层潜水蒸发或偶发降雨下渗停留)，自由水仅在稀有的大雨洪水时才出现并很快蒸发殆尽。因此，一些极端荒漠生态系统中反而难以识别“两种水”，因为常年有效的只有一种水库(植物吸水与稀少的渗漏补给可能都与地下水有关)。这属于假说的适用边界问题：当环境干旱到一定程度，土壤-植物-水的系统可能退化为单一水库控制，即植物和地下径流都主要来自同一个蓄水层。例如，在一些远离河岸区域，土壤剖面基本干燥，胡杨等树木直接利用潜水，河道基流也是由同一潜水排出，此时植物水与河水同位素几乎无差别，表现为分离消失(周天河等, 2017; 李裕红等, 2020)。因此，在草原荒漠生态系统，中等干早度最有利于“两水世界”现象的出现：有足够的降雨产生地表径流(自由水)，又有足够的干旱形成深层束缚水依赖。而极端湿润或极端干旱都趋向于同一水源。

5.3 农田与人工生态系统

相对于自然生态系统，农田和人工生态系统中关于“两水世界”的研究还不多，但已有一些初步认识。农田通常经过平整土地和耕作，土壤结构和植被类型与天然系统差异显著。灌溉农田中，由于人工施水往往定量定时，土壤长期处于高湿度，难以形成稳定的束缚水库，作物根系可直接获取大部分土壤水(Wang et al., 2023)。因此推测在高强度灌溉

下，生态水文分离现象不明显——作物消耗的水与田间排水在源头上重叠度高。不过，在雨养农业或农林复合系统中，情形有所不同。一些雨养果园(如苹果园)的研究发现，树木深根可以利用土壤深层贮水甚至岩隙水，从而在无降雨时期维持生长，而表层土壤在降雨后很快产生径流或被浅根杂草利用，两者之间形成分离(Pang et al., 2025)。在农林复合系统中，乔木与下层作物可能分别对应束缚水和自由水利用，从而降低了水分竞争。在湿润平原农田，大量排水沟渠和犁底层可能塑造特殊的优先流路径(Dollinger et al., 2015)，使得降水很快下渗为地下排水，作物更多依赖根区土壤存水。由此推想，即使在湿润地区，人工改变土壤结构也能导致一定的水文分离：自由水沿犁沟等路径排走，束缚水被根区土壤持留供作物后期吸收。但这方面的同位素证据仍缺乏。随着精准农业对土壤水有效性关注增加，应用“两水世界”理念区分土壤中“可被作物利用的水”和“难以利用的水”具有重要实践意义。可进行探索性实验，例如通过土壤张力计和中子湿度计监测，估计出某些土层的水对大田作物根系“无效”，从而优化灌溉深度和频率以减少水分浪费。

综上，不同生态系统对“两水世界”假说的验证情况各异：森林和草原中已有较多支持性研究，但在极端湿润或干旱的情境下也出现例外；而农田等人工系统是未来值得深入研究的方向。有必要结合各生态系统的水文和生态特点对假说进行情景化分析，明确其适用范围和边界条件。

6 科学争议与概念拓展

尽管“两水世界”假说已得到广泛关注和大量证据支持，但围绕其合理性和普遍性的讨论依然热烈。学界对该假说的态度大致可分为3类：完全支持、部分支持以及质疑反对。以下总结主要的科学争议点并讨论假说的概念演进。

争议1：假说的理论基础及环境适用性。一些学者质疑，将土壤水简单二分为束缚与自由两类是否过于理想化。Dubbert等(2019)提出，以空间和时间上的土壤水分动态完全可以解释观察到的同位素差异，无需假定两个永久隔离的水库。他们的“加权池模型”显示，只要考虑土壤中蒸发富集水所占比例随深度变化，并结合植物的机会性根水利用策略，就能再现植物水与地下水/径流水的同位素区别。这

实际上是用连续分布模型替代了二元假设，认为土壤水库是连续变化的，而非截然两分。同样，Sprenger等(2019)、Allen和Kirchner (2022)倡导采用多种工作假说检验现象：除了完全分离，也考虑部分混合、根系分馏等多种可能，以免过早定论。这些观点推动了概念的扩展：从最初强调“无交换的两个水库”，到接受“存在一定程度交换”“某些情况下只有弱分离”等更广义情形。目前的倾向是，将“两水世界”视为一个连续谱：在谱的一端是完全分离(极少交换)，另一端是完全混合，中间则是各种程度的部分分离。实地条件大多落在中间而非极端。因此，一些学者建议不再问“假说是否成立”这样非黑即白的问题，而是研究“特定环境下分离效应的强弱及其驱动因素”。这有助于将争议转化为更具体的科学问题，如：“哪种土壤类型分离效应最强？”“年降水量和分离程度有何定量关系？”等。

争议2：方法学因素对结论的影响。正如5.1和5.2讨论的，同位素取样和分析方法可能人为地强化或削弱“两水世界”假设的成立。这引发了一个质疑：是否“两水世界”仅是分析偏差导致的假象？例如，Chen等(2020)校正偏移后得出植物水与土壤水并无显著系统性差异。尽管后续研究(Zhao, 2021)对抽提偏差的影响范围与情境进行了再评估，但真空抽提确会引入 $\delta^2\text{H}$ 的系统偏差。例如，早期一些经典实验使用了冷冻抽提法获取植物水，后来证明该法对氢同位素有负偏差，则这些实验中报告的植物水与土壤水差异就需要重新评估。为回应这种质疑，研究者做了两方面努力：一是如前述，通过改进和交叉验证方法来确保观测现象真实可靠；二是重视独立重复和多指标验证(He et al., 2023)。如果不同研究者在不同地区、采用不同方法都观测到相似的植物-土壤水同位素分异，那这一现象基本可以确认不是某特定方法导致的。例如，“两水世界”最初的发现者Renée Brooks等(2010)使用张力计和抽提双方法已相互验证，后来不同学者用氚示踪、离子示踪等都得到印证。这种多重证据让方法偏差导致假象的可能性大大降低。总地来说，目前共识认为：方法学问题可能影响定量细节(如分离程度的估计值)，但不太可能否定分离现象的存在。相反，这场争议促进了该领域更严格的实验规范，提高了结果的可信度。

争议3：两类水库交换与连通程度。原始假说指出“束缚水”主要供给植物蒸腾和土壤蒸发，而“自

由水”主要补给径流和地下水，但后来许多研究提示二者间存在一定水力连通(Good et al., 2015)。围绕这个问题形成了“完全分离”与“部分连接”两种观点。一派(完全分离论)认为束缚水库由土壤微孔和化学吸附所控制，在水力上基本不与大孔隙流动水交换；另一派(部分连接论)则收集了一些现场证据，如在长时间湿润条件下深层土壤束缚水的同位素会逐渐向降水值靠近，表示仍有慢速渗流或弥散作用连接两库。Finkenbiner等(2022)用模型模拟发现，要解释一些观测现象，同位素必须允许存在少量但非零的交换通量，否则模型误差较大。目前倾向的观点是：束缚水与自由水之间通常存在一定程度的交换，但交换速率和比例因情境而异。这一认识实际上丰富了“两水世界”概念，使之包含了动态交互的可能，而非静态隔离。这也推动了理论从最初的静态假说走向动态假说：既描述稳态分离格局，又允许水库间流量交换作为重要过程。这种概念拓展对模型意义重大，因为完全隔离模型与允许少量交换的模型在预测极端事件行为上会有所不同(如长时间无雨后首次降雨的响应，二者差异显著)。

争议4：其他过程的作用被忽视。有学者指出，“两水世界”假说在强调土壤水二元分布时，可能低估了植物生理和大气过程对同位素分布的影响。例如前述根系吸水分馏和树干水库效应等(Lin & da S L Sternberg, 1993)。如果一个地区观测到植物茎干水与土壤水不同，究竟是因为植物用了不同来源的水，还是因为用了相同的水却在过程中发生了分馏或滞留？这需要仔细辨别。过去不少工作默认根系吸水不分馏，这也许是一种简化。随着Poca等(2019)、Barbeta等(2020)提供了根系可能分馏的证据，应重新审视过往数据，看看其中有多少差异可以用分馏效应解释，而非真正的水源分离。这一思路虽然有价值，但目前来看，单靠根系分馏尚无法解释许多体系中观测到的巨大同位素差异。分馏效应通常在千分之几到千分之十几范围，而不少植被水与径流水的 δ 值相差千分之几十。因此，更可能的是两者共同作用：既有水源分离，也叠加了一定的生理分馏，使差异加剧或数据散点增大。针对这一争议，未来需要将生理过程纳入模型，用综合模型去验证各因子的相对贡献。如果一个包含生理分馏过程的模型依然需要生态水文分离才能贴合数据，那么分离就是独立存在的；反之，如果添加生理分馏即可解释所有

差异，则需反思生态水文分离假说的必要性。

在概念拓展方面，“两水世界”假说已超越其字面含义，融入更广阔的水文循环框架。比如可以将其与全球“绿水vs蓝水”理论联系起来，因为两水世界提供了微观证据支持绿水和蓝水在很多情况下确实来源不同。这帮助桥接了传统水文和生态水文学：以前绿水和蓝水的划分更多是水量概念，现在有了稳定同位素这样有力的手段，可以在流域尺度验证这一划分。另一些拓展则表现为学科交叉：土壤物理学将两水世界视为移动/滞留水的生物学体现，生态学则将其视为水分分配如何影响群落竞争格局的理论依据。这个概念还激发了相关领域的假说，比如“双重氮世界”（植物可利用的氮源与流失氮源是否也分离）。当然，这些都是延伸性的想法，但体现出“两水世界”假说的影响力已超出水分本身，开始启发对其他元素循环和生态过程的重新思考。

综合来看，围绕“两水世界”假说的争议推动了研究的深入和概念的完善。从最初的二元论断，到如今更强调定量分级和动态交互，该假说正不断演进。争议尚未完全清晰，但科学就是在这样的质疑和求证中趋于成熟。可以预见，随着更多证据和更完善理论的出现，我们对生态水文分离的认识将更加全面和精准。

7 未来研究方向与生态意义

基于以上进展和存在的问题，未来关于“两水世界”假说的研究需要在多学科和多尺度上展开。以下几个方向我们认为尤为重要，并亟需讨论其潜在的生态学意义。

(1)深入揭示植物吸水机制与根际过程：目前对于植物为何往往倾向利用束缚水缺乏机理层面的解释。未来研究应将同位素示踪与根系解剖、生理测定相结合，从微观尺度阐明根系吸水动力学(Zhao et al., 2016; Barbetta et al., 2020)。如应用X射线CT或核磁共振成像观察活体根系在土壤孔隙中的分布，与土壤含水状态关联分析(郭蓉, 2020)。同时，通过微根箱实验控制不同土壤湿度梯度，实时监测各级根系的吸水速率和水势变化，判断根系对不同基质水的吸收能力。如果发现根系在一定阈值以上的土壤基质势下几乎不吸水，那就定量证明了束缚水的“阈值”效应。此外，应重视根际微生物和菌根对植物取水的帮助(Poca et al., 2019; Bi et al., 2022;

Sachsenmaier et al., 2024; Wu et al., 2024)。很多植物与丛枝菌根真菌共生，菌丝可延伸进入微孔吸水，然后传递给植物。通过给菌根接种与否的对比实验，测量植物在干土中的水分吸收差异，可评估菌根对束缚水利用的贡献。这些研究将帮助回答：植物吸水偏好是源于根系特征限制，还是有主动适应行为？不同植物功能型(乔木、灌木、草本)在吸取束缚水方面有多大差异？解决这些问题，不仅有助于完善生态水文分离理论，也是预测植物干旱响应、选育耐旱作物的重要基础。

(2)改进水同位素高频监测技术与标准化体系：在技术层面，需要继续提升现场同位素监测的精度、频率和覆盖度。现有的原位水汽同位素监测仪虽已能提供精细数据，但在数据稳定性和仪器耐性上仍有不足(文明宜, 2022)。未来应开发在野外恶劣环境下更稳定的水同位素分析仪，实现长期无人值守运行。同时，研制自动取样系统，例如程序控制的多路阀，将不同深度土壤水、树干水依次导入分析仪，实现同步监测。对于一些关键但目前技术尚不能直接监测的部位(如深层土壤水或根系汁液)，可以考虑构建代表性实验网络，如在典型林地中安装贯穿土壤剖面的全自动张力计组和树干导水监测仪，定期获取样品分析(Oerter & Bowen, 2017)。不同仪器与方法之间也需要交叉比对和校准，以确保数据一致性。例如，将现场红外光谱仪与实验室质谱仪测定结果进行对比，矫正系统误差。通过这些努力，可建立一套高时间分辨率且跨区域可比的生态同位素监测网络(Berry et al., 2018; Seeger & Weiler, 2021)。这将极大推动我们了解动态条件下束缚水与自由水的转化：例如可以捕捉暴雨发生时，两水库同位素在几分钟内如何响应；干旱逐渐加剧时，植物水分来源如何在不同土层或不同水源之间转换。这些丰富的信息将为构建和验证动态模型提供支撑，也有助于预警极端气候事件对生态水文分离的影响。在标准化方面，建议由国际水文同位素组织牵头制定土壤-植物水取样与分析指南，统一采样深度、时间和方法标注，如规定报告某地生态水文分离程度时需给出使用的方法类型，以便今后研究的横向比较和meta分析。

(3)建立多尺度耦合的生态水文模型：传统流域水文模型通常假设土壤水均匀混合，不考虑束缚水与自由水之分，这在模拟植被耗水和径流过程时可

能产生系统偏差。一些新进展，如Knighton等(2020)已尝试将树干储水和混合纳入模型。未来应在此基础上进一步将“两水世界”理念融入多尺度模型中：在小尺度(如植株尺度)，模拟单株植物与其根区土壤剖面上束缚水与自由水的比例、交换和分别利用率；在流域尺度，通过各坡面单元参数化整合出流域整体的束缚/自由水库分离；在更大区域(如不同气候带)，则将气候、土层和植被类型作为控制因子，预测各区域分离效应强度分布。关键是要为模型引入必要的状态变量：例如增加“束缚水含量”这个变量及其演变方程，并设置与传统土壤含水量的动态交换参数。McMillan等(2014)曾提出过锥形框架，即把土壤水划分为移动和滞留两库，利用高频观测校准交换系数，使模型更真实地再现降雨-径流延迟和植物蒸腾特征。未来模型研究可借鉴这一思路，并吸收近年来的大量观测数据，使参数取值更加可靠。另一挑战在于尺度缩放：小尺度上的分离机制(如根系在土壤微孔中的微观吸水)如何有效表征到大尺度模型？这需要通过敏感性分析找出对大尺度输出影响最大的参数，并用等效参数方法简化微观过程的表达。多尺度模型一旦建立，将具有重要的实用意义：它可以用来自预测极端事件下的流域水文响应(例如在超常干旱或暴雨情境下，传统模型可能高估或低估径流，因为未考虑两水库作用，而新模型将更接近实际)；也可用于评估土地利用变化(如植被恢复)对水资源的影响。如果模型显示某地区植被大幅增加后蒸腾主要利用以前的土壤束缚水，那么造林就不会显著减少河川径流，反而提高降水利用率。这对水资源管理极具参考价值。

(4)开展跨区域和跨生态系统的协同研究：当前对“两水世界”假说的验证主要集中在少数气候类型，如地中海气候森林、温带林地和部分半干旱区(Renée Brooks et al., 2010; Goldsmith et al., 2012; Zhao et al., 2013)。对于湿润热带雨林、高纬度针叶林、草原以及农田生态系统，研究相对不足。未来应设计多区域协同试验，在全球具有代表性的生态系统中采用统一的方法进行观测(Stumpp et al., 2014)。例如，可以建立一个涵盖从热带到寒带、从荒漠到湿润森林的国际野外台站网络，每个台站按照统一规范监测土壤水和植物水同位素、土壤水势、降雨特征等指标，持续至少一个完整的水文年，即一年的枯水期末到第二年该时期，包含完整的水文

循环事件。通过这种同步试验，可直接比较不同气候/生态条件下束缚水与自由水的比例、交换率和季节动态。特别值得关注的是那些目前假说无法很好解释的系统，如前述湿润雨林和极端荒漠。如果在这些系统中也发现分离现象，我们就需要扩展理论；如果没有发现，则可以明确假说的边界。在多区域研究中，采用标准化的数据处理和统计分析也很重要，以排除由于实验设计差异带来的干扰。最终目标是绘制出一幅“全球生态水文分离地图”，标注不同地区的分离程度及不确定性。这不仅有助于验证“两水世界”假说的普适性，也将为各区域水资源管理提供依据：例如哪类区域植被消耗的水主要来自束缚水(意味着增加植被不会明显减少径流)，哪类区域则相反。

(5)融合多示踪手段深化过程解析：未来研究需突破仅靠H、O单一同位素技术的局限，尝试将多种示踪技术融合使用。比如，结合氚可以提供水龄信息，搭配稳定同位素可以区分新旧水库；结合阴阳离子浓度和微量元素可以反映水与土壤接触时间，从侧面验证水库滞留时间的不同(Figueroa-Johnson et al., 2007)。另外，应用热中子法(如中子湿度计)测量表层土壤含水量动态(姚立民, 2011)，与深层张力计数据结合，可估计束缚水库的补充和释放过程。最近的发展还有非传统稳定同位素，如¹⁷O和²H-¹H-¹H同位素，这些可以提供有关蒸发和凝结的额外信息，帮助识别土壤水曾经的过程。多参数联合示踪的一大优势在于可以交叉验证：当多项证据都指向相似结论时，结果更可靠(汪集旸等, 2015)；反之，如果不同指标出现矛盾，就需分析背后原因，从而获得对过程更全面的认识。例如，如果同位素显示植物水偏向老水，但离子浓度显示植物水与新降水无异，这可能提示根系在取水时发生了选择性离子过滤或补偿吸收，需要进一步研究。未来还应开发新型传感器，实现对多种指标的同步原位监测，使数据具有严格的时间对应性。通过多示踪融合，我们有望更清晰地解开“两水世界”背后的机理之谜，把各相关过程区分开来定量描述。

(6)强调生态学意义和应用价值：最后，需要将“两水世界”假说的研究与实际生态环境管理相结合，挖掘其生态学意义(李裕红等, 2020; 雷自然等, 2023)。首先，在全球气候变化背景下，干旱和极端降雨事件增多，生态水文分离现象可能会强化。例

如更强的降雨脉冲将产生更多的自由水直接径流流失，植物对深层束缚水的依赖加大，进而影响生态系统抗旱能力。因此，研究成果可用于预测植被对气候变化的响应，识别对水源分离敏感的地区。在流域管理中，如果了解到某流域植被蒸腾耗水几乎全来自束缚水，那么在评估植被恢复对径流的影响时就不应简单按照“增加蒸腾=减少径流”线性关系来计算，可能需考虑植被会更多利用通常难利用的土壤蓄水。这为生态修复和水源地管理提供了新的思路：既要保持适度植被覆盖以利用束缚水、减少土壤水无效蒸发，又不能过度增加以免两水库出现连通进而消耗掉蓝水部分。对于农业灌溉来说，理解作物实际可利用的土壤水库，可指导精细灌溉策略：如在沙质土壤上，大雨灌溉可能大部分成为自由水渗漏，不如多次少量灌溉补充提高束缚水库含量供作物吸收(Zhao et al., 2018)。这些都是“两水世界”假说潜在的应用方向。总之，将理论研究与生态实践对接，能凸显其价值，也能为理论发展注入持续动力。

8 结论

“两水世界”假说自2010年提出以来，在学术界引发了对于土壤-植物-水分关系的新思考和大量研

究。总体上，大量实证结果证实了降水入渗后土壤水可分为束缚水和自由水两类的普遍现象，以及植物偏好利用束缚水而径流来源于自由水的生态水文分离。“两水世界”假说挑战了传统水文模型假设，极大推动了水文学与生态学的交叉融合。近年来，随着原位同位素监测和改进土壤水提取等新方法的发展，我们对生态水文分离的时空动态、两水库之间的有限连通以及在不同气候生态系统中的表现有了更深入的了解。同时，研究也凸显出该领域仍存在关键科学问题：如束缚水与自由水严格定义和判别标准尚不统一，二者的转化机制和环境驱动因子未明；植物水源判识受方法学局限，结果存在不确定性；目前多数模型无法表征双水库过程等。

展望未来，通过多学科协作和新技术应用，“两水世界”假说有望得到进一步发展(图3)。我们认为，未来通过多学科协作、技术革新与跨区域实验，将能够更深入揭示生态水文分离的内在机制及其在陆地水循环中的作用，为改进水文模型、提升水资源管理提供坚实的科学依据。生态水文学正处于转型升级的关键阶段，“两水世界”假说不仅挑战了传统水文理论，也为重新认识森林、草原、农田乃至整个陆地生态系统中的水分运转提供了全新的视角。

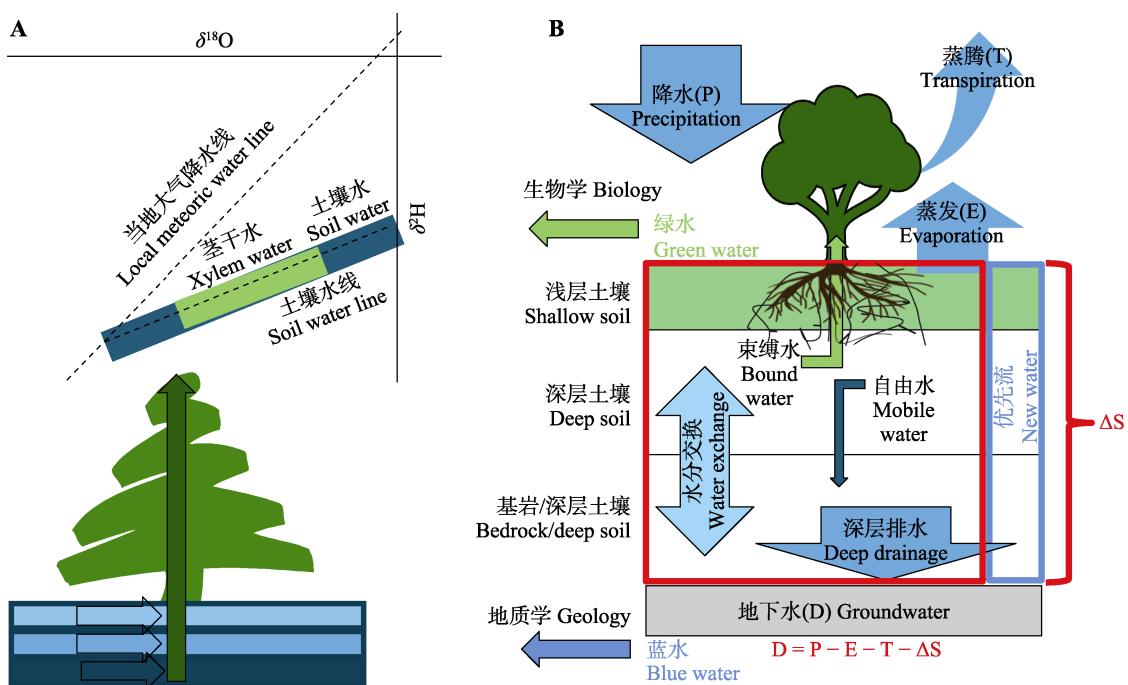


图3 生态水文过程及其分离机制未来研究展望示意图。 ΔS ，土壤储水量变化；D，渗漏；E，蒸发；P，降雨；T，蒸腾。 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为样品的氢氧同位素比值相对于标准物质同位素比值的千分差。

Fig. 3 Schematic diagram of ecohydrological processes. ΔS , change of soil water storage; D, drainage; E, evaporation; P, precipitation; T, transpiration. $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ represent the stable hydrogen and oxygen isotope ratios corresponding to the international isotope ratio standard V-SMOW.

参考文献

- Allen ST, Kirchner JW (2022). Potential effects of cryogenic extraction biases on plant water source partitioning inferred from xylem-water isotope ratios. *Hydrological Processes*, 36, e14483. DOI: 10.1002/hyp.14483.
- Allen ST, Kirchner JW, Braun S, Siegwolf RTW, Goldsmith GR (2019). Seasonal origins of soil water used by trees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 1199-1210.
- Barbeta A, Gimeno TE, Clavé L, Fréjaville B, Jones SP, Delvigne C, Wingate L, Ogée J (2020). An explanation for the isotopic offset between soil and stem water in a temperate tree species. *New Phytologist*, 227, 766-779.
- Barbeta A, Jones SP, Clavé L, Wingate L, Gimeno TE, Fréjaville B, Wohl S, Ogée J (2019). Unexplained hydrogen isotope offsets complicate the identification and quantification of tree water sources in a riparian forest. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 2129-2146.
- Bates CG, Henry AJ (1928). Second phase of streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colo. *Monthly Weather Review*, 56, 79-80.
- Benettin P, Volkmann THM, von Freyberg J, Frentress J, Penna D, Dawson TE, Kirchner JW (2018). Effects of climatic seasonality on the isotopic composition of evaporating soil waters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 2881-2890.
- Berry ZC, Evaristo J, Moore G, Poca M, Steppe K, Verrot L, Asbjornsen H, Borma LS, Bretfeld M, Hervé-Fernández P, Seyfried M, Schwendenmann L, Sinacore K, De Wispelaere L, McDonnell JJ (2018). The two water worlds hypothesis: addressing multiple working hypotheses and proposing a way forward. *Ecohydrology*, 11, e1843. DOI: 10.1002/eco.1843.
- Beven K, Germann P (1982). Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18, 1311-1325.
- Bi YL, Wu C, Wang SM, Gao XJ, Xue C, Yang W, Li MC, Xiao L, Christie P (2022). Combined arbuscular mycorrhizal inoculation and loess amendment improve rooting and revegetation post-mining. *Rhizosphere*, 23, 100560. DOI: 10.1016/j.rhisph.2022.100560.
- Bowling DR, Schulze ES, Hall SJ (2017). Revisiting streamside trees that do not use stream water: Can the two water worlds hypothesis and snowpack isotopic effects explain a missing water source? *Ecohydrology*, 10, e1771. DOI: 10.1002/eco.1771.
- Brunel JP, Walker GR, Kennett-Smith AK (1995). Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 167, 351-368.
- Chen Y, Helliker BR, Tang X, Li F, Zhou Y, Song X (2020). Stem water cryogenic extraction biases estimation in deuterium isotope composition of plant source water. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117, 33345-33350.
- Chen YN, Li WH, Zhou HH, Chen YP, Hao XM, Fu AH, Ma JX (2014). Analysis of water use strategies of the desert riparian forest plant community in inland rivers of two arid regions in northwestern China. *Biogeosciences Discussions*, 11, 14819-14856.
- Cui JP, Tian LD, Gerlein-Safdi C, Qu DM (2017). The influence of memory, sample size effects, and filter paper material on online laser-based plant and soil water isotope measurements. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 31, 509-522.
- de la Casa J, Barbeta A, Rodríguez-Uña A, Wingate L, Ogée J, Gimeno TE (2022). Isotopic offsets between bulk plant water and its sources are larger in cool and wet environments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 4125-4146.
- Dollinger J, Dagès C, Bailly JS, Lagacherie P, Voltz M (2015). Managing ditches for agroecological engineering of landscape. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 999-1020.
- Dubbert M, Caldeira MC, Dubbert D, Werner C (2019). A pool-weighted perspective on the two-water-worlds hypothesis. *New Phytologist*, 222, 1271-1283.
- Ehleringer JR, Dawson TE (1992). Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 15, 1073-1082.
- Evaristo J, Jameel Y, Chun KP (2021). Implication of stem water cryogenic extraction experiment for an earlier study is not supported with robust context-specific statistical assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118, e2100365118. DOI: 10.1073/pnas.2100365118.
- Evaristo J, Jasechko S, McDonnell JJ (2015). Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow. *Nature*, 525, 91-94.
- Evaristo J, McDonnell JJ, Scholl MA, Bruijnzeel LA, Chun KP (2016). Insights into plant water uptake from xylem-water isotope measurements in two tropical catchments with contrasting moisture conditions. *Hydrological Processes*, 30, 3210-3227.
- Figueroa-Johnson MA, Tindall JA, Friedel MJ (2007). A comparison of $\delta^{18}\text{O}$ composition of water extracted from suction lysimeters, centrifugation, and azeotropic distillation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184, 63-75.
- Finkenbinder CE, Good SP, Renée Brooks J, Allen ST, Sasidharan S (2022). The extent to which soil hydraulics can explain ecohydrological separation. *Nature Communications*, 13, 6492. DOI: 10.1038/s41467-022-34215-7.
- Goldsmith GR, Muñoz-Villers LE, Holwerda F, McDonnell JJ, Asbjornsen H, Dawson TE (2012). Stable isotopes reveal

- linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest. *Ecohydrology*, 5, 779-790.
- Good SP, Noone D, Bowen G (2015). WATER RESOURCES. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science*, 349, 175-177.
- Gu HL, Chen GP, Ren H, Liu B, Yang QY, Feng XY, Fan MY, Zhou H (2025). Seasonal dynamics of water-use strategies and response to precipitation in different habitats of *Nitraria* L. *Journal of Hydrology*, 648, 132388. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132388.
- Guo R (2020). *Examination of the Ecohydrological Separation Hypothesis in Hillside, Mountain Foot and Flood Plain of the Lanzhou City*. Master degree dissertation, Northwest Normal University, Lanzhou. [郭蓉 (2020). 兰州市山坡、山麓、河漫滩生态水文分离假说验证. 硕士学位论文, 西北师范大学, 兰州.]
- He D, Wen MY, Wang YB, Du GY, Zhang CC, He HL, Jin JJ, Li M, Si BC (2023). Xylem water cryogenic vacuum extraction: testing correction methods with C aviTron-based apple twig sampling. *Journal of Hydrology*, 621, 129572. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129572.
- Hervé-Fernández P, Oyarzún C, Brumbt C, Huygens D, Bodé S, Verhoest NEC, Boeckx P (2016). Assessing the ‘two water worlds’ hypothesis and water sources for native and exotic evergreen species in south-central Chile. *Hydrological Processes*, 30, 4227-4241.
- Hewlett JD, Hibbert AR (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas//Sopper WE, Lull HW. *Forest Hydrology*. Pergamon Press, New York. 275-290.
- Horton JH, Hawkins RH (1965). Flow path of rain from the soil surface to the water table. *Soil Science*, 100, 377-383.
- Knighton J, Kuppel S, Smith A, Soulsby C, Sprenger M, Tetzlaff D (2020). Using isotopes to incorporate tree water storage and mixing dynamics into a distributed ecohydrologic modelling framework. *Ecohydrology*, 13, e2201. DOI: 10.1002/eco.2201.
- Landon MK, Delin GN, Komor SC, Regan CP (1999). Comparison of the stable-isotopic composition of soil water collected from suction lysimeters, wick samplers, and cores in a sandy unsaturated zone. *Journal of Hydrology*, 224, 45-54.
- Lei ZR, Jia GD, Yu XX, Liu ZH (2023). A review of stable hydrogen and oxygen isotopic offset in plant water source research. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 25-40. [雷自然, 贾国栋, 余新晓, 刘子赫 (2023). 植物水分来源稳定氢氧同位素偏移研究进展. 植物生态学报, 47, 25-40.]
- Li YH, Sternberg L, Lin GH (2020). Recent advances and future perspectives on applications of two water worlds hypothesis to isotopic ecohydrological research. *Journal of Isotopes*, 33, 423-434. [李裕红, Sternberg L, 林光辉 (2020). 同位素生态水文学的“双水世界假说”及其研究进展. 同位素, 33, 423-434.]
- Lin GH, da S L Sternberg L (1993). Hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants//Ehlertinger JR, Hall AE, Farquhar GD. *Stable Isotopes and Plant Carbon-water Relations*. Academic Press, New York. 497-510.
- Liu YP, Fang YC, Hu HC, Tian FQ, Dong ZQ, Khan MYA (2020). Ecohydrological separation hypothesis: review and prospect. *Water*, 12, 2077. DOI: 10.3390/w12082077.
- Lyu SD, Song XW, Wen XF (2019). Ecohydrologic separation of the mixing process between precipitation and soil water: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 1797-1806. [吕斯丹, 宋贤威, 温学发 (2019). 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, 30, 1797-1806.]
- McDonnell JJ (2014). The two water worlds hypothesis: ecohydrological separation of water between streams and trees? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1, 323-329.
- McMillan H, Gueguen M, Grimon E, Woods R., Clark M, Rupp DE (2014). Spatial variability of hydrological processes and model structure diagnostics in a 50 km² catchment. *Hydrological Processes*, 28, 4896-4913.
- Moreno-Gutiérrez C, Dawson TE, Nicolás E, Querejeta JI (2012). Isotopes reveal contrasting water use strategies among coexisting plant species in a Mediterranean ecosystem. *New Phytologist*, 196, 489-496.
- Munksgaard NC, Wurster CM, Bass A, Bird MI (2012). Extreme short-term stable isotope variability revealed by continuous rainwater analysis. *Hydrological Processes*, 26, 3630-3634.
- Nehemy MF, Benettin P, Asadollahi M, Pratt D, Rinaldo A, McDonnell JJ (2021). Tree water deficit and dynamic source water partitioning. *Hydrological Processes*, 35, e14004. DOI: 10.1002/hyp.14004.
- Oerter EJ, Bowen G (2017). In situ monitoring of H and O stable isotopes in soil water reveals ecohydrologic dynamics in managed soil systems. *Ecohydrology*, 10, e1841. DOI: 10.1002/eco.1841.
- Orłowski N, Pratt DL, McDonnell JJ (2016). Intercomparison of soil pore water extraction methods for stable isotope analysis. *Hydrological Processes*, 30, 3434-3449.
- Orłowski N, Winkler A, McDonnell JJ, Breuer L (2018). A simple greenhouse experiment to explore the effect of cryogenic water extraction for tracing plant source water. *Ecohydrology*, 11, e1967. DOI: 10.1002/eco.1967.
- Pang TZ, Zhao Y, Poca M, Wang JJ, Li HC, Liu JZ (2025). Analyzing water uptake of apple trees using isotopic techniques in the Shandong Peninsula, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, 102153. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.102153.

- Penna D, Hopp L, Scandellari F, Allen ST, Benettin P, Beyer M, Geris J, Klaus J, Marshall JD, Schwendenmann L, Volkmann THM, von Freyberg J, Amin A, Ceperley N, Engel M, et al. (2018). Ideas and perspectives: tracing terrestrial ecosystem water fluxes using hydrogen and oxygen stable isotopes—Challenges and opportunities from an interdisciplinary perspective. *Biogeosciences*, 15, 6399-6415.
- Phillips FM (2010). Soil-water bypass. *Nature Geoscience*, 3, 77-78.
- Poca M, Coomans O, Urcelay C, Zeballos SR, Bodé S, Boeckx P (2019). Isotope fractionation during root water uptake by Acacia caven is enhanced by arbuscular mycorrhizas. *Plant and Soil*, 441, 485-497.
- Radolinski J, Pangle L, Klaus J, Stewart RD (2021). Testing the ‘two water worlds’ hypothesis under variable preferential flow conditions. *Hydrological Processes*, 35, e14252. DOI: 10.1002/hyp.14252.
- Radolinski J, Vremec M, Wachter H, Birk S, Brüggemann N, Herndl M, Kahmen A, Nelson DB, Kübert A, Schaumberger A, Stumpf C, Tissink M, Werner C, Bahn M (2025). Drought in a warmer, CO₂-rich climate restricts grassland water use and soil water mixing. *Science*, 387, 290-296.
- Renée Brooks J, Barnard HR, Coulombe R, McDonnell JJ (2010). Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature Geoscience*, 3, 100-104.
- Sachsenmaier L, Schnabel F, Dietrich P, Eisenhauer N, Ferlian O, Quosh J, Richter R, Wirth C (2024). Forest growth resistance and resilience to the 2018–2020 drought depend on tree diversity and mycorrhizal type. *Journal of Ecology*, 112, 1787-1803.
- Schlesinger WH, Jasechko S (2014). Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190, 115-117.
- Seeger S, Weiler M (2021). Temporal dynamics of tree xylem water isotopes: *in situ* monitoring and modeling. *Biogeosciences*, 18, 4603-4627.
- Soulsby C, Birkel C, Geris J, Dick J, Tunaley C, Tetzlaff D (2015). Stream water age distributions controlled by storage dynamics and nonlinear hydrologic connectivity: modeling with high-resolution isotope data. *Water Resources Research*, 51, 7759-7776.
- Sprenger M, Stumpf C, Weiler M, Aeschbach W, Allen ST, Benettin P, Dubbert M, Hartmann A, Hrachowitz M, Kirchner JW, McDonnell JJ, Orlowski N, Penna D, Pfahl S, Rinderer M, et al. (2019). The demographics of water: a review of water ages in the critical zone. *Reviews of Geophysics*, 57, 800-834.
- Stumpf C, Klaus J, Stichler W (2014). Analysis of long-term stable isotopic composition in German precipitation. *Journal of Hydrology*, 517, 351-361.
- Surma J, Assonov S, Staubwasser M (2021). Triple oxygen isotope systematics in the hydrologic cycle. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 86, 401-428.
- Vargas AI, Schaffer B, Li YH, da Silveira Lobo Sternberg L (2017). Testing plant use of mobile vs immobile soil water sources using stable isotope experiments. *New Phytologist*, 215, 582-594.
- Volkmann THM, Haberer K, Gessler A, Weiler M (2016). High-resolution isotope measurements resolve rapid ecohydrological dynamics at the soil-plant interface. *New Phytologist*, 210, 839-849.
- von Freyberg J, Allen ST, Grossiord C, Dawson TE (2020). Plant and root-zone water isotopes are difficult to measure, explain, and predict: some practical recommendations for determining plant water sources. *Methods in Ecology and Evolution*, 11, 1352-1367.
- Wang JY, Chen JS, Lu BH, Tong HB, Tan ZC, Sun YY, Lin T, Wang YS (2015). Review and prospect of isotope hydrology. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 43, 406-413. [汪集旸, 陈建生, 陆宝宏, 童海滨, 谭忠成, 孙营营, 林统, 王永森 (2015). 同位素水文学的若干回顾与展望. 河海大学学报(自然科学版), 43, 406-413.]
- Wang L, Zhu GF, Qiu DD, Liu YW, Zhao KL, Sang LY, Zhang ZX, Sun ZG, Yong LL, Jiao YY (2023). The use of stable isotopes to determine optimal application of irrigation-water to a maize crop. *Plant and Soil*, 482, 679-696.
- Wassenaar LI, Hendry MJ, Chostner VL, Lis GP (2008). High resolution pore water $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ measurements by $\text{H}_2\text{O}_{(\text{liquid})}-\text{H}_2\text{O}_{(\text{vapor})}$ equilibration laser spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 42, 9262-9267.
- Wen MY (2022). *Mechanism and Improvement of Isotopic Bias on Cryogenic Vacuum Extracted Soil Water and Plant Water*. PhD dissertation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi. [文明宜 (2022). 真空抽提土壤和植物水同位素偏差机理及改进方法研究. 博士学位论文, 西北农林科技大学, 陕西杨凌.]
- Wen MY, Zhao XN, Si BC, He D, Li M, Gao XD, Cai YH, Lu YW, Wang YB (2023). Inter-comparison of extraction methods for plant water isotope analysis and its indicative significance. *Journal of Hydrology*, 625, 130015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130015.
- Wu C, Bi YL, Zhu WB (2024). Is the amount of water transported by arbuscular mycorrhizal fungal hyphae negligible? Insights from a compartmentalized experimental study. *Plant and Soil*, 499, 537-552.
- Xu YQ, Zhao H, Zhou BQ, Dong ZW, Li GY, Li SY (2024). Variations in water use strategies of *Tamarix ramosissima* at coppice dunes along a precipitation gradient in desert regions of northwest China. *Frontiers in Plant Science*, 15,

1408943. DOI: 10.3389/fpls.2024.1408943.
- Yao LM (2011). *Response Mechanism and Simulation of Young Haloxylon ammodendron Root Water Absorption to Soil Water and Salt Stress*. PhD dissertation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi. [姚立民 (2011). 幼龄梭梭根系吸水对土壤水盐胁迫的响应机理及其模拟研究. 博士学位论文, 西北农林科技大学, 陕西杨凌.]
- Zhao LJ, Wang LX, Cernusak LA, Liu XH, Xiao HL, Zhou MX, Zhang SQ (2016). Significant difference in hydrogen isotope composition between xylem and tissue water in *Populus euphratica*. *Plant, Cell & Environment*, 39, 1848-1857.
- Zhao P, Tang XY, Zhao P, Wang C, Tang JL (2013). 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*, 503, 1-10.
- Zhao X, Li FD, Ai ZP, Li J, Gu CK (2018). Stable isotope evidences for identifying crop water uptake in a typical winter wheat-summer maize rotation field in the North China Plain. *Science of the Total Environment*, 618, 121-131.
- Zhao Y (2021). An incorrect wetness-based correction method for deuterium offset. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118, e2026641118. DOI: 10.1073/pnas.2026641118.
- Zhao Y (2022). *Plant Water Use Strategies and Mechanisms in the Semi-arid Region of the Loess Plateau*. PhD dissertation, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi. [赵影 (2022). 黄土高原半干旱区植物水分利用策略及机制. 博士学位论文, 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西杨凌.]
- Zhou TH, Zhao CY, Wu GL, Jiang SW, Yu YX, Wang DD (2017). Application of stable isotopes in analyzing the water sources of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* in the upstream of Tarim River. *Journal of Desert Research*, 37, 124-131. [周天河, 赵成义, 吴桂林, 蒋少伟, 俞永祥, 王丹丹 (2017). 塔里木河上游胡杨 (*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix ramosissima*)水分来源的稳定同位素示踪. 中国沙漠, 37, 124-131.]
- Zuecco G, Amin A, Frentress J, Engel M, Marchina C, Anfodillo T, Borga M, Carraro V, Scandellari F, Tagliavini M, Zanotelli D, Comiti F, Penna D (2022). A comparative study of plant water extraction methods for isotopic analyses: scholander-type pressure chamber vs. cryogenic vacuum distillation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 3673-3689.

特邀编委: 邓美凤 责任编辑: 赵航