

稳定同位素方法评估“两个水世界”假设的研究现状与展望

赵影^{1,2} 王力^{1,3*}

(¹中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 “两个水世界”的假设(two water worlds hypothesis, TWW)认为, 土壤中存在两个相互独立且功能不同的水库, 束缚水库用于植物生存生长, 移动水库补给河川径流及地下水。该假设区别于传统水文模型中一个土壤水库的理论, 对构建新的水文模型意义重大。目前, TWW假设的理论基础及形成条件仍不明确, 尤其国内研究尚不多见。因此, 本文总结了TWW假设的研究现状、判别方法、争议点以及未来的研究方向。目前, 关于TWW假设的研究结果分为3种: 支持、部分支持以及拒绝该假说, 所有的评估方法都是基于氢、氧同位素(²H, ¹⁸O)方法实现的, 如直接比较法、降水交结点法、降水残差法和降水偏移法等。束缚水与移动水同位素样品的代表性以及同位素技术的局限性可能是产生不同结果的重要原因, 发展不同于稳定同位素手段的方法是未来研究的一个重要方向。另外, 该假设的理论基础尚不清楚是当前面临的最关键的科学问题。TWW假设涉及到降水、土壤和植被三者耦合所形成的连续的生态水文过程, 多学科融合、多尺度评估、多因素分析是深入研究该假设的有效途径, 也将是水文学与生态学领域的重要研究方向。

关键词 氢氧同位素; 生态水文分割; 水文连通性; 移动水; 束缚水

Assessing the “two water worlds” hypothesis by stable isotope method: Progress and prospect. ZHAO Ying^{1,2}, WANG Li^{1,3*} (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: According to the two water worlds hypothesis (TWW), there are two independent water pools with different functions in the soil matrix, bound water world used by plants and mobile water world contributed to runoff and groundwater recharge. The TWW hypothesis is different from the original hydrological model that soil water is completely mixed, and is of significance for establishing new hydrological models. Currently, the theoretical basis and formation conditions of TWW hypothesis are still unclear, with less research from China. Here, we summarized research process, discrimination method, controversial points and prospect of TWW hypothesis. There are three views regarding the hypothesis: support, partial support, and rejection. All evaluation methods are based on hydrogen and oxygen isotope (²H, ¹⁸O) methods, such as direct comparison, precipitation intersection point method, precipitation residual method, and precipitation migration method. The representativeness of isotope samples of bound water and mobile water and the limitation of isotope technology may be the important reasons for different results across all the studies. The development of methods different from stable isotope ones is an important direction of future research. In addition, the theoretical basis of TWW hypothesis remains unclear, which is the most critical issue. The hypothesis is

本文由国家自然科学基金项目(41771545, 41977012, 41530854)和中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室(SKLLQG1718)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41771545, 41977012, 41530854) and the State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences (SKLLQG1718).

2020-01-01 Received, 2020-02-12 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

about a continuous ecological hydrological process coupling of precipitation, soil, and vegetation. Multi-disciplinary integration, multi-scale assessment and multi-factor analysis would be the effective ways to study this hypothesis, and would be an important research direction in the field of hydrology and ecology.

Key words: $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$; ecohydrological separation; hydrological connectivity; mobile water; bound water.

土壤水是全球陆地水循环的组成部分,是联结大气、植被和土壤的重要媒介,在不同物相间转换以及物质输送中扮演着重要角色。在生态水文循环中,非饱和带土壤水分的运移以及与植物间的交互作用被认为是最复杂也是最重要的部分,前人尝试用各种生态水文模型来模拟这一过程^[1-2],这些模型多数均假定降水入渗进入土壤后与土壤中原来贮存的水分充分混合,形成单一的土壤水库,植物在这个单一均匀混合的水库中吸收利用水分。但是,Brooks 等^[3]基于稳定氢、氧同位素方法,提出了“两个水世界”的假设(two water worlds hypothesis, 以下简称 TWW 假设),该假设不同于以往植物水分来自一个水库的认知,认为土壤中存在两个水库,一个是束缚水库,贮存在土壤小孔隙中,用于供给植物吸收利用;另一个是移动水库,用于补给河川径流及地下水;同时,这两个水库不存在混合交换过程,呈现完全分离的生态水文分割现象^[4]。降水进入土壤后,经过“土壤”这一载体的再分配,形成两个独立且功能不同的水库,深刻影响着植物水分的吸收利用、地下水/径流的补给和响应机制。

在以往水文过程的研究中,降水进入土壤以后主要通过活塞流向下运移^[5]。在活塞流模式中,水文连通性较高,“新水”与“旧水”混合,缓慢地向更深层次入渗,充分体现了一个水库的假设。在一些特殊通道如土壤裂隙、植物根系以及动物巢穴等存在快速流动的水流,即优先流。这种模式下可能存在生态水文分割。然而,以往研究更多地关注于两种模式下水分入渗速率的差异,对于两种入渗模式的水分是否发生交换、交换程度如何、是否承担着相同的功能,如补充地下水和供给植物利用等生态水文过程研究较少。而 TWW 假设则明确地将混合的土壤水库分割为独立的两个水库,且植物蒸腾水源只来自于束缚水库。该假设的提出,对重新理解植物水分来源、水分循环机制、各水文要素的演变及分配比例产生重要影响。植物蒸腾是全球陆地水循环的主导因子,占陆地蒸散发总量的 80% 以上,每年将 6.2 万 km^3 的水汽重新返还大气^[6-7]。若 TWW 理

论为真,则代表植物蒸腾产生的水汽仅来源于土壤束缚水库,深刻影响当前基于一个混合的土壤水库的前提下利用同位素方法评估蒸散发分割模型的精确度。例如,当利用下游溪流或者湖泊的同位素值进行蒸散发拆分时可能存在较大的不确定性,因为汇入下游溪流或者湖泊中的水不能完全代表流域的水文特征^[8]。另外,当前评估陆地水循环的研究中,常用方法是在流域尺度内利用水量平衡公式进行计算,即输入量(降水)-输出量(径流、蒸散发)^[9],TWW 假设表明贮存在土壤中的“旧水”与输入的“新水”存在分割,径流输出以“新水”为主,而蒸散发输出以“旧水”为主,这不仅影响着土壤水的滞留时间,也会对评估营养物质或者污染物的迁移速率产生影响。综上所述,明确 TWW 假设的发生条件,验证和分析生态水文分割的机制,能够为探索土壤水分运移机制以及土壤-植物的相互作用关系提供新的方向,对于生态水文学、土壤物理学等相关学科的发展可能产生积极的推动作用。目前,国内对 TWW 假设及理论基础的研究尚不多见^[10-12],本文综述了 TWW 假设的研究现状、研究方法、争议点以及未来的研究方向,以期促进国内相关研究人员对 TWW 的认识,加深对生态水文分割现象的了解、明确 TWW 假设的理论基础提供参考。

1 TWW 假设研究现状

Brooks 等^[3]在地中海气候区的研究结果发现,降水、河水、移动水(利用张力计提取,吸力为 -60 kPa)的同位素值(^2H 、 ^{18}O)落在区域降水线(local meteoric water line, LMWL)上,土壤水(利用真空抽提系统获得)和植物木质部水的同位素值则偏离 LMWL,落在土壤蒸发线(evaporation water line, EWL)上,因而提出了 TWW 假设。该假设认为,土壤中存在移动水库和束缚水库,移动水补充径流和地下水;植物则只消耗土壤小孔隙内的束缚水,并且当束缚水库第一次被填满之后,两个水库将不再发生交换作用,直至土壤束缚水不断减少,不足以满足植物需要时,植物开始利用混合水源。TWW

假设是对生物(植物)、非生物因素(土壤)共同作用下的降水分割过程进行研究,其本质是降水进入土壤后形成功能各异且相互独立的土壤束缚水库和移动水库,当土壤束缚水能够满足植物的需求,尽管张力计可提取的移动水存在,植物仍倾向于利用土壤束缚水。自该假设提出以来,引起了广泛争议^[4,13]。由于地中海气候区夏季炎热干燥、冬季温和多雨,不同于其他的气候类型,因而该假说的普适性也有待于考证。近年来,在不同气候区评估该假设的有效

性成为近 10 年生态水文领域的研究热点^[14]。归纳起来,评估 TWW 假设的研究结果有如下 3 种(表 1)。

第一种观点认为该假设成立。目前,在地中海气候区、墨西哥地区的热带山地云雾林、东非赤道附近的查拉湖地区、波多黎各东北部以及西南部非季节性热带气候区等^[3,11-19]均证实生态水文分割明显存在。Evaristo 等^[20]在全球 47 个地区的研究结果表明,生态水文分割现象广泛存在于干旱气候区、

表 1 TWW 假设的案例研究汇总

Table 1 Summary of case studies testing the TWW hypothesis

是否支持 TWW View on TWW	案例编号 Case number	研究区位置 Study area	结果 Result
支持 Support	1	美国俄勒冈州,地中海气候 Oregon, USA, Mediterranean climate	最早提出 TWW,土壤中存在两个水库,移动水库贡献于径流补给,束缚水库贡献于植物蒸腾 ^[3]
	2	墨西哥韦拉克鲁斯州,季节性干热气候 Veracruz, Mexico, seasonally dry tropical climate	该研究证实 TWW 存在。移动水库与径流相关,束缚水库与植物蒸腾有关 ^[15]
	3	查拉湖,季节性干热气候 Lake Chala, seasonally dry tropical climate	植物主要水源来自每年 11—12 月降水补给的土壤束缚水库,2—5 月的降水则以移动水的形式补给地下水 ^[16]
	4	波多黎各,热带气候 Puerto Rico, tropical climate	TWW 在年降水量为 1200 和 3700 mm 的 Luquillo 和 Susua 地区同时存在,并指出该假设成立的驱动因子是土壤水蒸发和植物利用 ^[17]
	5	美国犹他州,温带大陆性气候 Utah, USA, temperate continental climate	河岸林木木质部同位素值与 0~1 m 的土壤水同位素值最接近,表明可能存在“两个水世界”。但作者无法解释植物木质部水比其他水源(土壤水、地下水和河水)都富集的现象 ^[18]
	6	西班牙,地中海气候 Spain, Mediterranean	在苏格兰松林粉质壤土中存在束缚水库与移动水库,两个水库几乎不发生交换作用 ^[19]
	7	全球 47 个研究地点 47 globally distributed sites	TWW 广泛存在于干旱、地中海、温带森林、温带草原以及热带气候区 ^[20]
部分支持 Partial support	8	美国萨克拉门托山,地中海气候 Sacramento Mountain, USA, Mediterranean climate	土壤束缚水来源于高山上的冰雪融水,是植物在春季和初夏的主要水源。在多雨的夏季,移动水是植物主要水源 ^[21]
	9	美国犹他大学季节性浇灌的观赏植物园 University of Utah campus, USA, a seasonally drip-irrigated ornamental garden	土壤中存在束缚水库和移动水库,但无法确定树木的水源 ^[22]
	10	中国西南地区,亚热带气候 Southwestern China, subtropical climate	TWW 临时性存在。雨季随着水文连通性的增加, TWW 消失 ^[10]
	11	中国长沙,亚热带湿润气候 Changsha, China, subtropical humid climate	在冬春季节,当土壤水库被前期降水补给后会发生生态水文分割 ^[11]
	12	智利,温带湿润性气候 Chile, temperate humid climate	TWW 只发生在旱季,雨季 TWW 消失 ^[23]
不支持 Reject	13	英国苏格兰北部,湿润、低能量气候 Northern Scotland, UK, the wet, low energy climate	植物茎水、土壤水、径流、降水具有相似的同位素组成 ^[24]
	14	英国苏格兰,湿润气候 Scotland, UK, humid climate	束缚水与移动水的同位素值随降水输入同步变化,不能判断植物水分来源 ^[25]
	15	中国太湖流域,季风气候 Taihu Lake Basin, China, monsoon climate	地下水位变化导致河水、浅层土壤水、深层土壤水和地下水之间相互补充、交换 ^[12]
	16	美国爱达荷州,大陆性气候 Boise, Idaho, USA, continental climate	植物水同位素值显著不同于径流和地下水,这种差异由季节原因引起,与土壤水的移动形式无关。因此,同位素数据不能解释 TWW ^[26]
	17	中国祁连山,温带大陆性气候 Qilian Mountains, China, temperate continental climate	稳定同位素方法不适合评估生态水文分割 ^[27]
	18	葡萄牙,地中海气候 Portugal, Mediterranean climate	土壤水、植物茎水以及地下水之间的同位素差异由干湿循环过程中水分的蒸发富集所致 ^[28]
	19	美国佛罗里达大学 University of Florida, USA	土壤束缚水与移动水存在交换现象。并且植物在水分利用过程中,其同位素值会发生分馏 ^[29]

地中海气候区、温带草原气候区、温带森林气候区以及热带气候区,其中,最显著的地区是热带和地中海气候区。

第二种观点认为 TWW 假设临时性存在。一般情况下,旱季降水量少,移动水随土壤干化而逐渐减少,植物倾向于利用稳定的束缚水源,使得 TWW 假设成立。然而,雨季土壤水得到充分补充,水文连通性增强,土壤束缚水与移动水之间相互补充、交换,导致植物根系利用不同土层深度的混合水源,并且该混合水源也会参与径流、地下水的补给,导致 TWW 假设无效(图 1)。例如,在美国西南部地区的萨克拉门托山脉、中国西南地区以及智利中南部地区等^[21-25]均证实 TWW 假设临时性存在。

第三种观点认为该假设不成立。具体原因如下:1)各水源具有相似的同位素组成。例如,Qian 等^[12]在中国太湖流域的研究发现,河水、地下水以及深层土壤水之间存在复杂的交换及补充关系,导致他们的氢、氧同位素无差异,高度体现了生态水文连通性。2)束缚水与移动水的同位素呈现差异与季节性变化有关,而与水的移动性无关^[26-28]。3)植物木质部水同位素发生分馏。Vargas 等^[29]研究表明,植物木质部水的氢、氧同位素存在分馏,且分馏程度与土壤质地、土壤含水量有关。当植物木质部水发生同位素分馏时,其同位素组成不能代表根系吸收水分的同位素组成,从而导致对植物水分来源

的误判。Oerter 等^[22]发现,櫻桃李(*Prunus cerasera*)木质部水同位素与 0~5 cm 的土壤水同位素相似。而櫻桃李的树高为 500 cm,其利用的水分不可能仅由 0~5 cm 土层补给。产生这种现象的原因可能是植物木质部发生了分馏。

由图 2 可以看出,在当前验证 TWW 假设的案例中,当年均降水量 < 1000、1000 ~ 2000 以及 > 2000 mm,相应的区域降水线斜率在 < 7.5、7.5 ~ 8 以及 > 8.5 时,TWW 假设均存在成立的案例。并且在年内降水均匀分配和不均匀分配的地区同样存在 TWW。该结果表明,降水对 TWW 假设的影响是复杂的。当降水较少时,土壤含水量较低,若土壤移动水与束缚水同时存在,束缚水能够满足植物的水分需求,则 TWW 假设可能有效;若土壤束缚水不能满足植物的需求,当再次发生降水事件时,植物势必要利用土壤移动水,此时 TWW 假设无效。当足够多的降水事件发生后,导致土壤中的小孔隙被填满,小孔隙水能够维持植物的正常需要,此时植物有可能选择只利用土壤束缚水,使得 TWW 假设有效。但是随着降水的增多,土壤水文连通性增加,极有可能引起束缚水库和移动水库发生交换,导致 TWW 假设无效。土壤是水分运移、交换的主要场所,土壤的粒径决定了水分运移的速率以及滞留时间,影响着两个水库的交换速率。然而,在当前评估 TWW 假设的案例中(表 1),只有少数研究表明土壤质地

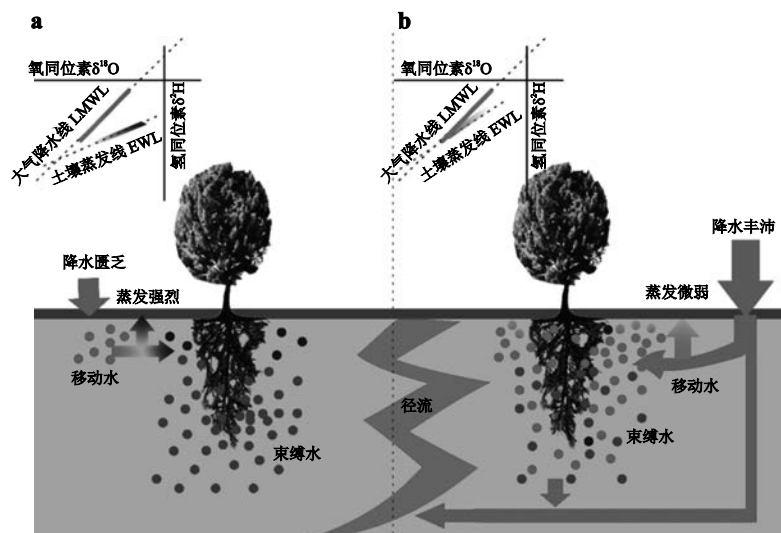


图 1 生态水文分割(a)和生态水文连通(b)示意图

Fig.1 Sketch map of ecological separation (a) and ecological connectivity (b).

a) 较少的降水输入,导致土壤中移动水减少,植物更倾向于利用土壤束缚水。此时,强烈的蒸发作用导致土壤水同位素富集,因而土壤蒸发线偏离区域大气降水线(LMWL) Mobile water in the soil matrix decreased gradually as lack of precipitation input, plants thus preferred to use bound water. Isotope compositions of soil water get enriched because of evaporation, which resulted in it deviated the local meteoric line (LMWL); b) 大量的降水输入,使得土壤束缚水与移动水充分混合,植物利用混合水源,此时土壤蒸发线接近区域大气降水线 Bound water and mobile water mixed well as abundant precipitation input, plant thus used mixed water sources. Isotopic compositions of soil water plotted on LMWL.

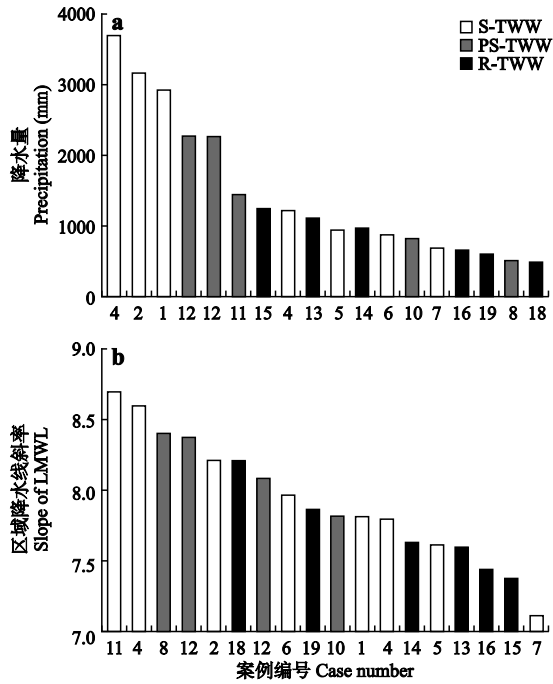


图 2 降雨量和区域大气降水线(LMWL)斜率对 TWW 假设的影响

Fig.2 Influence of precipitation and slope on local meteoric water line (LMWL) on the TWW hypothesis.

横坐标的案例编号见表 1. S-TWW、PS-TWW 和 R-TWW 分别代表支持、部分支持以及拒绝 TWW 假设 The case number on the x-axis was shown in Table 1. S-TWW, PS-TWW and R-TWW represented support, partial support and rejection of the TWW hypothesis, respectively.

(图 3)、颗粒组成对土壤水库分割有影响^[3]。此外, 植被类型、生活型以及水分利用策略也会影响 TWW 假设的评估。如植被的根系长度决定植物获取水源的能力。浅根系植物难以利用深层的稳定水源, 受降水影响较大, 因而当降水事件发生时, 浅根系植物利用降水的可能性很大, 导致 TWW 假设无效。等水、非等水植物采取不同的策略来适应干旱, 不仅改变了植物水分的利用方式, 同时也会对植物水源获取产生影响, 进而影响 TWW 假设的评估^[28]。另外, 水力再分布现象也可能引起土壤水同位素值发生改变^[30]。综合分析降水、土壤和植被对 TWW 假设的影响, 有助于明确该假设的形成条件以及土壤-植物的相互作用关系。降水量不仅影响水文连通性, 也决定植物的水分需求能否得到满足。土壤质地影响降水入渗的同时, 也决定了土壤中束缚水和移动水的比例。不同植被类型不仅对水分的需求不同, 采取的水分利用策略也不尽相同, 因而, 多学科融合、多角度综合分析是构建 TWW 假设理论基础的重要前提。

TWW 假设将植物用水与径流/地下水补给加以区分, 充分体现了生态水文分割。但这种分割的

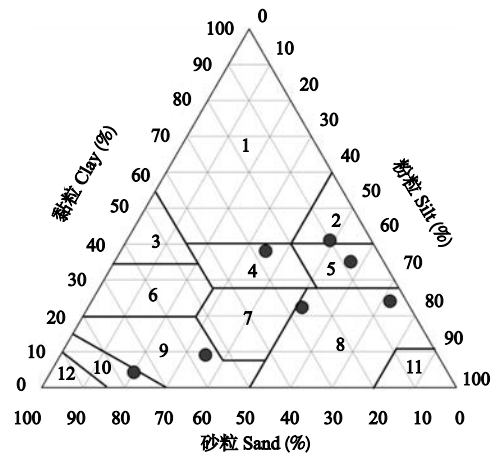


图 3 TWW 案例中(表 1)土壤样品的颗粒组成(黑色圆点)(美国分类制)

Fig.3 Soil textures (black dots) in TWW studies (Table 1) within USDA soil texture classification system.

图中数字 1~12 分别代表黏土、粉质黏土、砂质黏土、黏壤土、粉质黏壤土、砂质黏壤土、壤土、粉质壤土、砂质壤土、壤砂土、粉土、砂土 Numbers from 1 to 12 corresponded to clay, silty clay, sandy clay, clay loam, silty clay loam, sandy clay loam, loam, silt loam, sandy loam, loamy sand, silt, sand, respectively.

程度及其机制尚不明确^[31]。首先, 生态水文分割是临时性分割还是永久分割? 例如, 部分研究认为 TWW 假设临时性有效^[21-25], 即在干旱时存在生态水文分割, 到了雨季, 这种分割就会消失。表明生态水文分割具有临时性。然而, Evaristo 等^[17] 在无明显季节变化但降水量相差较大的波多黎各的东北部和西南部均证实 TWW 假设有效, 说明它可能存在永久性的分割。其次, 生态水文的时空分割问题。多数研究已经证实植物通过土壤基质吸收利用的水分明显不同于补给地下水的水分^[3, 11-19], 表明存在空间分割。当前, 对于时间分割的研究相对较少, 即植物对水分的吸收利用与地下水的补给是否会发生在不同时段^[14]。最近, Evaristo 等^[32] 研究表明, 时间分割与空间分割是同时存在, 但他们在水文分割过程中发挥的相对作用仍不明确^[31]。

2 TWW 假设的判别方法

同位素分馏是影响不同水源产生同位素(²H, ¹⁸O)差异的主要原因。降水蒸发是平衡分馏过程, 同位素值不会发生变化。而土壤水蒸发发生在非平衡分馏条件下, 强烈的动力学分馏效应导致同位素值富集。地下水、径流、河水以及移动水主要由降水直接补充, 因而其同位素值落在 LMWL。当植物主要利用降水时, 其同位素值会接近于 LMWL。反之, 若植物水源更多地来自土壤束缚水时, 其同位素值

则会偏离 LMWL, 接近于 EWL。根据这一判定标准, 衍生出多种基于同位素技术 (^2H , ^{18}O) 判定 TWW 假设的方法, 如直接比较法^[3,15,18]、降水交结点法 ($\delta^2\text{H}_{\text{LMWL-int}}$)^[16]、降水残差法 (line-conditioned excess, lc-excess)^[17,19,26] 和降水偏移法 (precipitation offset 或者 lc-excess*)^[10,12,23,25]。其中, 较常用的方法有降水残差法和降水偏移法。两者的计算公式相似, 不同之处是降水偏移法增加了一个表征不确定性的参数, 使计算结果更为可靠^[18]。最近, Luo 等^[11] 提出分段同位素平衡法 (piecewise isotope balance), 通过高频率采集植物木质部水与降水样品, 计算两次连续降雨事件之间根系区降水补给植物可利用水的比例, 进而判别 TWW 假设。Allen 等^[14] 利用季节性起源指数 (seasonal origin index) 表征降水具有明显季节性差异地区的土壤和植物水同位素值相对于季节性降水的变化, 可以在一定程度上确定植物所利用的是夏季水源、冬季水源或是混合水源, 从而判定该假设。以上方法都存在不同的缺陷, 可能导致对生态水文分割产生误判, 比如, 降水交结点源值的计算只能用来比较发生蒸发分馏之前的土壤水和木质部水, 降水残差主要反映土壤束缚水与自由水的差异, 分段同位素平衡法忽略了蒸发效应等, 这些缺陷均会引起一定误差, 导致对生态水文分割的判别产生显著的不确定性。另外, 这些方法本质上属于同一种手段, 即依据土壤-植物-大气系统中不同要素的稳定同位素组成 (^2H , ^{18}O) 之间的差异判别生态水文的分割程度。鉴于同位素方法本身的限制, 结合传统土壤物理学和生态水文的基本理论, 发展不同于稳定同位素手段的方法, 是科学辨识 TWW 假设是否存在的重要研究方向^[13]。

3 TWW 假设的争议点

当前 TWW 假设存在诸多争议, 主要集中在 5 个方面: 1) 该假设的普适性有待于考证。针对 TWW 现象, 学者们产生了不同的评估结果。当前的研究数据显示 (表 1), 支持、部分支持以及不支持的结果分别占案例总数的 37%、26% 和 37%。即使在同一气候区, TWW 假设均有成立或者不成立的案例。因此, 开展多时空、多尺度的 TWW 研究, 仍将是未来的重要研究方向之一。2) 该假设的理论基础仍不明确。植物叶片细胞由于蒸腾失水造成叶片水势降低, 形成土壤-根-茎-叶水势依次减小的分布格局。在这种水势梯度作用下, 水分由土壤进入植物根系, 沿茎导管上升至叶片, 以补充蒸腾所耗散

的水分。随着土壤水势的降低, 植物需要消耗更多的能量来获取水分。然而, TWW 研究发现, 植物木质部水的同位素值 (^2H , ^{18}O) 更接近于总体土壤水 (包括移动水与束缚水), 而不是移动水 (-60 ~ 0 kPa)。重力水 (-10 ~ 0 kPa) 具有较快的移动性可能不容易被植物利用 (图 4), 但利用张力计 (-70 ~ -60 kPa) 所提取的流动性低的移动水的同位素值同样区别于植物茎水。为什么植物没有选择更容易获得、消耗能量更少的这部分水源呢^[4,11]? 目前仍缺乏合理的解释。有研究推测为土壤束缚水的养分含量高于移动水, 植物为了获取更多的养分而倾向于优先利用束缚水, 但仍缺乏充足的证据支持^[19]。3) 束缚水与移动水的代表性。当前技术中, 常用大孔隙根际吸盘法 (macrorhizon suction cups, -200 kPa)、多孔杯式蒸渗仪法 (porous cup lysimeter, -60 kPa) 提取土壤移动水, 低温真空抽提法 (cryogenic vacuum extraction, -10 ~ -15 MPa) 或者液压挤压法 (hydraulic squeezing, -41 MPa) 可提取总体土壤水 (包括束缚水和移动水)^[4,26]。但这两类提取方法所获得的水分能否代表土壤移动水与束缚水仍值得商榷。同时, 由于提取方法、提取时间的不同, 移动水与总体土壤水的提取程度会存在差异^[34]。Orlowski 等^[35] 比较了 5 种常用的实验室孔隙水萃取技术 (高压机械压缩法、离心法、直接蒸汽平衡法、微波萃取以及低温真空萃取法), 结果发

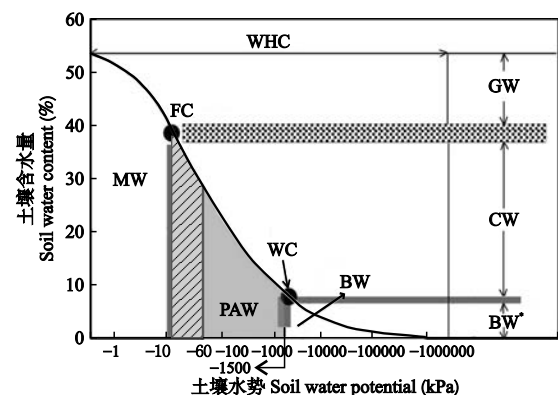


图 4 在 TWW 假设和土壤学中^[33]的土壤水类型划分

Fig.4 Dividing the type of soil water in the TWW hypothesis and soil science^[33].

WHC: 最大持水量 Water holding capacity; FC: 田间持水量 Field capacity; GW: 重力水 Gravitational water; CW: 毛管水 Capillary water; WC: 萎蔫系数 Wilting coefficient; PAW: 植物可利用水 Plants available water; MW: 移动水 Mobile water; BW: 束缚水 Bound water. BW 和 MW 分别对应 TWW 假设中的移动水与束缚水, GW (CW) 和 BW* 分别对应土壤物理学中的自由水和束缚水 BW and MW corresponded to bound water and mobile water in the TWW hypothesis, respectively. GW (CW) and BW* corresponded to bound water and mobile water in the soil physics, respectively.

现,所有方法提取的土壤孔隙水的同位素组成与参考标准之间均存在显著偏差,偏差程度取决于土壤类型及土壤含水量。4) 菌根真菌。研究发现,菌根真菌与植物根系形成具有一定结构和功能的共生体,促进了植物生长并提高其干旱耐受能力,原因在于菌根真菌可能会吸收凋萎湿度以下的水分^[7,11],当前技术手段仅能提取 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ m 土壤孔径内的水分,尚不能有效提取真菌菌丝所能利用的孔径范围($10^{-6} \sim 10^{-5}$ m)内的水分^[13],因此仍不明确它在植物水分利用过程中发挥的作用。5) 稳定同位素技术的局限性。稳定同位素技术已经广泛地应用于植物水源判别以及蒸散发分割研究。一般认为,除盐生、旱生植物以外,植物木质部水氢、氧同位素值不会发生分馏。但当前评估 TWW 假设的案例中发现,一些植物种的木质部水发生了同位素分馏,从而无法准确判断其水分来源^[29]。即使植物木质部水不发生分馏,在季节性不明显的地区,各水源间也可能不存在明显的同位素差异,进而无法判断植物水分来源。基于此,有研究认为稳定同位素技术不合作为 TWW 假设的判别工具^[22]。

4 研究展望

TWW 假设为生态水文过程的研究提供了新的思路。该假说将土壤水库划分为移动水库和束缚水库。若两者完全发生交换作用,则变成均一的、完全混合的土壤水库,即当前水文模型的原假设。若两者完全不发生交换作用,则“两个水世界”的假设成立。更普遍的情形可能是两个水库发生部分交换作用,此时土壤中可能存在多个水库,如“新水库”、“旧水库”以及“新水和旧水的混合水库”。在根-土界面,根系的固结作用会影响根系固结土体内的水分(根系水库)与外界水源的交换速率,因而可能导致根系水库不同于外界的水库。与基于完全混合的传统生态水文模型相比,从一个水库到两个水库的转变,对进行蒸散发组分分割、径流形成、溶质运移等过程的研究更为重要^[8]。例如,当前在利用稳定同位素技术进行蒸散发分割时,假定植物水分来自完全均匀混合的一个土壤水库,而如果“两个水世界”的假说成立,以一个水库为前提的研究会大大降低预测结果的准确性^[16]。此外,土壤生物地球化学的很多过程与反应(如岩石分化、养分循环)发生在围绕于矿质颗粒表面的薄层束缚水膜上,这些束缚水一方面表现出明显不同于移动水的物理性状(如移动性不同),另一方面可能包含了更多的养分

和溶质,因此,明晰束缚水和移动水的分配比例和相互作用关系,不仅有助于水量平衡过程各分量的精确计算,而且更有利于污染物质(养分流失)的管理和预测^[31]。因此,开展多时空、多尺度的 TWW 研究,对于深入探索水文过程以及植物-土壤的相互关系具有重要的科学意义,将是水文学与生态学领域的重要研究方向。

参考文献

- [1] Alila Y, Kuras PK, Schnorbus M, *et al.* Forests and floods: A new paradigm sheds light on age-old controversies. *Water Resources Research*, 2009, **45**: W08416
- [2] McDonnell JJ, Sivapalan M, Vaché K, *et al.* Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. *Water Resources Research*, 2007, **43**: W07301
- [3] Brooks JR, Barnard HR, Coulombe R, *et al.* Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature GeoScience*, 2010, **3**: 100–104
- [4] McDonnell JJ. The two water worlds hypothesis: Ecohydrological separation of water between streams and trees? *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water*, 2014, **1**: 323–329
- [5] Gazis C, Feng XH. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, 2004, **119**: 97–111
- [6] Jasechko S, Sharp ZD, Gibson JJ, *et al.* Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*, 2013, **496**: 347–350
- [7] Good SP, Noone D, Bowen G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science*, 2015, **349**: 175–177
- [8] 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 [Lyu S-D, Song X-W, Wen X-F. Ecohydrologic separation of the mixing process between precipitation and soil water: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(6): 1797–1806]
- [9] McDonnell JJ. Beyond the water balance. *Nature GeoScience*, 2017, **10**: 396
- [10] Zhao P, Tang XY, Zhao P, *et al.* Temporal partitioning of water between plants and hillslope flow in a subtropical climate. *Catena*, 2018, **165**: 133–144
- [11] Luo ZD, Guan HD, Zhang XP, *et al.* Examination of the ecohydrological separation hypothesis in a humid subtropical area: Comparison of three methods. *Journal of Hydrology*, 2019, **571**: 642–650
- [12] Qian J, Zheng H, Wang PF, *et al.* Assessing the ecohydrological separation hypothesis and seasonal variations in water use by *Ginkgo biloba* L. in a subtropical riparian area. *Journal of Hydrology*, 2017, **553**: 486–500

- [13] Berry ZC, Evaristo J, Moore G, *et al.* The two water worlds hypothesis: Addressing multiple working hypotheses and proposing a way forward. *Ecohydrology*, 2017, DOI: 10.1002/eco.1843
- [14] Allen ST, Kirchner JW, Braun S, *et al.* Seasonal origins of soil water used by trees. *Hydrology Earth System Sciences*, 2019, **23**: 1199–1210
- [15] Goldsmith GR, Muñoz-Villiers LE, Holwerda F, *et al.* Stable isotopes reveal linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest. *Ecohydrology*, 2012, **5**: 779–790
- [16] De Wispelaere L, Bode S, Herve-Fernandez P, *et al.* Plant water resource partitioning and isotopic fractionation during transpiration in a seasonally dry tropical climate. *Biogeosciences*, 2017, **14**: 73–88
- [17] Evaristo J, McDonnell JJ, Scholl MA, *et al.* Insights into plant water uptake from xylem-water isotope measurements in two tropical catchments with contrasting moisture conditions. *Hydrological Processes*, 2016, **30**: 3210–3227
- [18] Bowling DR, Schulze ES, Hall SJ. 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*, 2017, **10**: e1771
- [19] Sprenger M, Llorens P, Cayuela C, *et al.* Mechanisms of consistently disjunct soil water pools over (pore) space and time. *Hydrology Earth System Sciences*, 2019, **23**: 2751–2762
- [20] Evaristo J, Jasechko S, McDonnell JJ. Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow. *Nature*, 2015, **525**: 91–94
- [21] Gierke C, Newton BT, Phillips FM. Soil-water dynamics and tree water uptake in the Sacramento Mountains of New Mexico (USA): A stable isotope study. *Hydrogeology Journal*, 2016, **24**: 808–818
- [22] Oerter EJ, Bowen G. *In situ* monitoring of H and O stable isotopes in soil water reveals ecohydrologic dynamics in managed soil systems. *Ecohydrology*, 2017, **10**: e1841
- [23] Hervé-Fernández P, Oyarzun C, Brumbt C, *et al.* Assessing the ‘two water worlds’ hypothesis and water sources for native and exotic evergreen species in south-central Chile. *Hydrological Processes*, 2016, **30**: 4227–4241
- [24] Geris J, Tetzlaff D, McDonnell JJ, *et al.* Ecohydrological separation in wet, low energy northern environments? A preliminary assessment using different soil water extraction techniques. *Hydrological Processes*, 2015, **29**: 5139–5152
- [25] Geris J, Tetzlaff D, McDonnell JJ, *et al.* Spatial and temporal patterns of soil water storage and vegetation water use in humid northern catchments. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 486–493
- [26] Mccutcheon RJ, Mcnamara JP, Kohn MJ, *et al.* An evaluation of the ecohydrological separation hypothesis in a semiarid catchment. *Hydrological Processes*, 2017, **31**: 1–17
- [27] Qiu X, Zhang MJ, Wang SJ, *et al.* The test of the ecohydrological separation hypothesis in a dry zone of the northeastern Tibetan Plateau. *Ecohydrology*, 2019, **12**: e2077
- [28] Dubbert M, Caldeira MC, Dubbert D, *et al.* A pool-weighted perspective on the two-water-worlds hypothesis. *New Phytologist*, 2019, **222**: 1271–1283
- [29] Vargas AI, Schaffer B, Li YH, *et al.* Testing plant use of mobile vs immobile soil water sources using stable isotope experiments. *New Phytologist*, 2017, **215**: 582–594
- [30] Hafener BD, Tomasella M, Haberle KH, *et al.* Hydraulic redistribution under moderate drought among English oak, European beech and Norway spruce determined by deuterium isotope labeling in a split-root experiment. *Tree Physiology*, 2017, **37**: 950–960
- [31] Bowen G. The diversified economics of soil water. *Nature*, 2015, **525**: 43–44
- [32] Evaristo J, Kim M, van Haren J, *et al.* Characterizing the fluxes and age distribution of soil water, plant water, and deep percolation in a model tropical ecosystem. *Water Resource Research*, 2019, **55**: 3307–3327
- [33] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2010 [Huang C-Y, Xu J-M. Soil Science. Beijing: China Agriculture Press, 2010]
- [34] Sprenger M, Tetzlaff D, Buttle J, *et al.* Measuring and modelling stable isotopes of mobile and bulk soil water. *Vadose Zone Journal*, 2018, **17**: 170149
- [35] Orłowski N, Pratt DL, McDonnell JJ. Intercomparison of soil pore water extraction methods for stable isotope analysis. *Hydrological Processes*, 2016, **30**: 3434–3449

作者简介 赵影, 女, 1993年生, 博士研究生。主要从事同位素水文研究。E-mail: 13898159705@163.com

责任编辑 杨弘

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



赵影, 王力. 稳定同位素方法评估“两个水世界”假设的研究现状与展望. 应用生态学报, 2020, **31**(4): 1417–1424

Zhao Y, Wang L. Assessing the “two water worlds” hypothesis by stable isotope method: Progress and prospect. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(4): 1417–1424