



# 水同位素分析与生态系统过程示踪：技术、应用以及未来挑战

汤显辉<sup>1</sup> 陈永乐<sup>1,2</sup> 李芳<sup>1,2</sup> 宋欣<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>深圳大学生命与海洋科学学院, 广东深圳 518060; <sup>2</sup>深圳大学光电工程学院电子器件与系统(教育部/广东省)重点实验室, 广东深圳 518060; <sup>3</sup>深圳大学深圳市海洋生物资源与生态环境重点实验室, 广东深圳 518060

**摘要** 水分是生态系统的重要因子, 水同位素自然示踪和人工标记是研究生态系统水循环过程的重要方法, 利用水同位素所具有的示踪、整合和指示等功能特征, 通过测量和分析生态系统中不同组分所含水分的氢氧同位素比值的变化情况, 可实现生态系统蒸散发的拆分、植物水分来源判定和叶片水同位素富集机理研究, 是研究生态系统水循环过程机理和生态学效应不可或缺的技术手段。该文首先简要回顾了生态系统水同位素发展和应用的历史, 在此基础上阐述了水同位素技术和方法在生态学研究热点领域应用的基本原理, 概述了水同位素在植物水分来源判定、蒸散发拆分、露水来源拆分、降水的水汽来源拆分以及<sup>17</sup>O-excess的研究进展, 并介绍了植物叶片水富集机理及基于稳定同位素的碳水耦合研究。最后, 指出了水同位素研究亟待解决的问题, 展望了水同位素应用的前沿方向, 旨在利用水同位素分析加深对生态系统的水分动态、植被格局和生理过程的理解。

**关键词** 氧同位素; 氢同位素; 示踪; 水循环; 生态系统过程

汤显辉, 陈永乐, 李芳, 宋欣 (2020). 水同位素分析与生态系统过程示踪: 技术、应用以及未来挑战. 植物生态学报, 44, 350–359. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0204

## Water isotope analysis for tracing ecosystem processes: measurement techniques, ecological applications, and future challenges

TANG Xian-Hui<sup>1</sup>, CHEN Yong-Le<sup>1,2</sup>, LI Fang<sup>1,2</sup>, and SONG Xin<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>College of Life Sciences and Oceanography, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China; and <sup>3</sup>Shenzhen Key Laboratory of Marine Biotic Resources and Ecological Environment, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

### Abstract

Stable oxygen and hydrogen isotope analysis provides an important tool to trace, integrate or indicate water fluxes from leaf, whole-plant to ecosystem levels. Through measuring and analyzing the natural variations in the hydrogen and oxygen isotope compositions of water from different components of ecosystem, we can partition evapotranspiration of ecosystem, determine source of plant water uptake, and study mechanism of leaf water isotope enrichment. As such, water isotope analysis has emerged as an indispensable technique to study the mechanism and ecological effects of different water cycle processes in ecosystem. In this paper, we briefly reviewed the history in development and application of water isotope analysis for terrestrial ecosystem studies, which then followed by more detailed introduction of the application principles and technical essentials. Furthermore, we reviewed progresses in diverse water-isotope based research field ranging from evapotranspiration partitioning, plant water uptake apportionment, sourcing of dew flux and precipitation vapor, to exploration leaf water isotope enrichment mechanisms and water-carbon coupling. Finally, we summarized technological and methodological challenges to be solved in the future ecological research, so as to fully realize the potential of water isotope analysis in various field of ecological research.

**Key words** oxygen isotope; deuterium isotope; tracing; water cycle; ecosystem processes

Tang XH, Chen YL, Li F, Song X (2020). Water isotope analysis for tracing ecosystem processes: measurement techniques, ecological applications, and future challenges. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 350–359. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0204

收稿日期Received: 2019-08-06 接受日期Accepted: 2019-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(31770435). Supported by the National Natural Science Foundation of China (31770435).

\* 通信作者Corresponding author (xinsong@szu.edu.cn)

水分是生态系统的核心因子, 影响和驱动着个体的生长、发育和繁殖, 以及生态系统的组成、演化和物质循环, 对于维持生态系统的功能和稳定具有重要意义(Chapin *et al.*, 2011)。然而由于人类活动增加, 全球水循环和水资源格局发生剧烈变化, 水循环过程机理研究对于缓解水资源短缺、调节水循环以及提高生态系统服务功能具有重要意义。降水、植物蒸腾、土壤和水体蒸发、凝露等影响大气和生态系统水汽交换的生态水文过程中, 伴有不同程度的同位素分馏效应, 记录了不同的生态过程信息, 使得水同位素分析成为研究生态系统水循环的重要手段, 其实质是通过测量和分析生态系统关键组分如土壤、植物茎叶或大气中所含水分的氧氢同位素比值( $\delta$ )来探究生态系统水循环的过程、机制及生态学效应。例如, 量化土壤蒸发和叶片蒸腾水汽的 $\delta$ 值可为估算生态系统蒸散发来源(即蒸散发拆分)提供实现路径(Wen *et al.*, 2016); 比较分析植物茎干木质部水分与其潜在水源的同位素关系可用来量化植物对不同来源水分的利用比例(Dawson & Ehleringer, 1991); 对叶片水同位素富集机理的探究则为解析树木年轮或叶蜡烷烃中所记录的气候或生理生态过程信息提供了理论基础(Cernusak *et al.*, 2016)。

自20世纪60年代以来, 水同位素理论和分析技术不断发展进步, 其在生态学中的应用大致可划分为以下三个不同阶段。第一阶段为水同位素研究的发轫和积累期(1966–1984年)。在这一时期, 研究人员研发了低温真空抽提(Wershaw *et al.*, 1970)水分提取技术, 为生态系统中不同“液态水”组分(如土壤和植物茎叶水)的测量清除了技术障碍。在此基础上, 围绕生态系统各组分水 $\delta$ 值的“普查式”测量揭示了以下重要的规律: 1) 土壤垂直剖面存在明显的同位素梯度(Zimmermann *et al.*, 1967; Fontes *et al.*, 1983); 2) 水分从根系进入植物茎干并在其木质部传输的过程中不存在同位素分馏(Zimmermann *et al.*, 1967); 3) 蒸腾导致叶片水的 $\delta$ 值显著高于茎干木质部水, 即叶片水的同位素相对富集(Craig & Gordon, 1965; Dongmann *et al.*, 1974; Farris & Strain, 1978)。第二阶段是对水同位素分馏机理认识不断深化的时期(1985–2004年)(Farquhar & Lloyd, 1993; Roden *et al.*, 2000), 也是基于同位素分析的生态学应用相继涌现的时期, 如植物水分来源区分(White *et al.*, 1985; Dawson & Ehleringer, 1991), 蒸散发拆分(Moreira *et al.*, 1997)等。

第三阶段为水同位素测量技术的创新发展期(2005年至今)。稳定同位素红外激光光谱技术的快速发展和推广使得同位素测量(特别是气态水的测量)变得前所未有的便捷(Lee *et al.*, 2005), 这标志着“三高”(高频率、高通量、高精度)时代正式到来, 推动水同位素的研究从机理(Holloway-Phillips *et al.*, 2016; Gerlein-Safdi *et al.*, 2017)到应用(Wang *et al.*, 2018; Dubbert & Werner, 2019)全方位走向繁荣。尽管水同位素分析在生态系统过程中已经有大量研究和进展, 但是水同位素测量技术进入创新发展期后, 对水同位素在生态系统过程中的应用、发展和未来挑战还缺乏系统论述。

本文阐述水同位素分析的基本原理, 基于影响大气和生态系统水汽交换的重要生态过程, 结合水同位素的示踪、整合和指示等功能, 概述植物水分来源判定、蒸散发拆分、露水凝结来源拆分、降水的水汽来源拆分和 $^{17}\text{O}$ -excess的应用及研究进展, 介绍植物叶片水富集机理和基于稳定同位素的碳水耦合研究, 并指出水同位素研究亟待解决的问题和水同位素应用的前沿方向。

## 1 水同位素分析的基本原理

自然界中氢元素有2种同位素:  $^1\text{H}$ 和 $^2\text{H}$  (D), 氧元素有3种同位素:  $^{16}\text{O}$ 、 $^{17}\text{O}$ 、 $^{18}\text{O}$ , 目前水同位素分析主要测量 $\text{H}_2^{18}\text{O}$ 和 $\text{HD}^{16}\text{O}$ 相对 $\text{H}_2^{16}\text{O}$ 的同位素比率( $R$ ), 再参考标准平均海洋水(VSMOW)的氢、氧同位素标准( $R_{\text{VSMOW}}$ ), 转换成相对于标准品的同位素比值( $\delta$ ), 一般用同位素分馏系数( $\alpha$ )或同位素判别值( $\Delta$ )来表示轻重同位素的分馏效应。

水同位素的分馏效应记录了生态系统水循环过程的关键信息, 自然条件下, 生态系统过程中主要存在3种形式的水同位素分馏效应, 物态转化过程发生热力学平衡分馏, 物相扩散过程发生的动力学分馏和生理生化活动时发生的生化分馏。植物吸收水分的过程中, 除少数几种盐生植物(Lin & Sternberg, 1993)外, 根系吸收的水分进入植物茎干并在其木质部传输的过程中不存在同位素分馏(Zimmermann *et al.*, 1967; Fontes *et al.*, 1983), 这使得基于不同源的 $\delta$ 值进行植物水分溯源成为可能(Ehleringer & Dawson, 1992)。蒸发和扩散过程的同位素分馏效应导致土壤水分重同位素随着土壤深度增加发生梯度明显的贫化, 而根系吸收的水分经木质部到

达叶片之前没有发生同位素分馏,通过蒸腾作用从叶片扩散到大气这一过程中,由于叶片水相态发生变化以及克服气孔和边界层阻力,又会导致叶片水较根系吸收的水分富集重同位素,因而土壤蒸发的 $\delta$ 值和植物蒸腾的 $\delta$ 值产生明显的差异,因此可以基于 $\delta$ 值差异拆分蒸散(ET)的组成部分——植物蒸腾(T)和土壤蒸发(E)(Moreira *et al.*, 1997)。除了根系吸收水分外,干旱区和湿润区的凝露也是植物重要的水分来源,虽然露水量很小,但却显著影响着植物的生理状况和微气象环境(Uclés *et al.*, 2014),而露水的3个主要来源——低空近地层大气水汽、土壤蒸发水汽和植物蒸腾水汽有着不同的 $\delta$ 值(Garratt & Segal, 1988),为确定不同露水凝结来源的比例奠定了基础(Wen *et al.*, 2012)。类似地,降水的水汽主要来源是大气水汽的平流输送、土壤蒸发水汽和植物蒸腾水汽(Davie, 2008),如果3个来源有着不同的 $\delta$ 值,即可用于确定不同水汽来源的比例(Genereux, 1998)。Craig (1961)最早提出全球降水线公式( $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ ),揭示了降水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 与气候因子和地理参数的关系,Dansgaard (1964)研究发现,在蒸发、冷凝和水汽传输等过程中,降水的氢氧同位素组成对于环境变化很敏感,提出了氘盈余(d-excess)的概念,即 $d\text{-excess} = \delta D - 8\delta^{18}O$ , d-excess可用于指示水汽源区相对湿度和温度等信息(Merlivat & Jouzel, 1979; Gat, 1981),前人基于此开展了大量 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 相关研究(Gat & Carmi, 1987; Swart *et al.*, 1989; Kendall & McDonnell, 1998; Aemisegger *et al.*, 2014),随着水同位素研究的不断深入和测量技术的不断发展, $\delta^{17}O$ 高精度测量方法的建立,三氧同位素在生态学研究中的应用越来越广泛。

## 2 生态系统水循环主要过程的同位素应用及其进展

### 2.1 植物水分来源判定

同位素数据的处理方法是植物水分来源研究领域关注的焦点。在方法学上,随着统计学思想的深度整合,基于同位素信号差异的水分来源贡献计算已从早期简单的端元模型(基于质量平衡的线性混合模型求解不同来源的相对贡献大小)演进到贝叶斯混合模型(如MixSIAR)等复杂方法(Moore & Semmens, 2008)。相比端元模型,贝叶斯模型充分考虑了贡献源过参数化等导致的数据不确定性,并引入

了分类协变量和连续协变量以及先验信息;由于计算的准确性,该方法已成为水源水量判定判定的一个主流方法(Rothfuss & Javaux, 2017)。

实际操作中,植物水分利用来源的研究往往需要对大量植物及土壤水分的 $\delta$ 值进行测定。在技术层面,近年来样品水分分析过程已出现了“去抽提化”的发展趋势。众所周知,以“真空抽提”为代表的传统抽提步骤耗时、费力、易出错,是水同位素分析的瓶颈。对此,研究人员发展了“直接水汽平衡”(Wassenaar *et al.*, 2008),“直接 $CO_2$ 平衡”(Scrimgeour, 1995)等新方法;此类方法将土壤或植物样品置于特定温度的封闭系统中,经过一定时间使系统内的水汽或 $CO_2$ 与样品水达到同位素平衡,进而通过测量平衡后水汽或 $CO_2$ 的 $\delta$ 值反推样品水的 $\delta$ 值。该方法绕过了水分抽提这个限速步骤,有望大幅度提高“液态水”组分的同位素分析效率。Rothfuss等(2013)介绍了一种利用可透气且强疏水性的多微孔聚丙烯管材,可以原位非破坏性取样,长期监测土壤水同位素的动态变化,该方法也可以拓展到植物水的原位非破坏性取样和同位素动态监测(Volkmann *et al.*, 2016);López Díaz等(2019)发展了一种全氟磺酸薄膜(Nafion membranes),可用于不同基质水体(如有机物、污染物等)的同位素精确测量,这些技术的发展有利于深入研究植物水和土壤水的动态变化以及提高植物水分来源的判定精度(Beyer & Dubbert, 2019)。

### 2.2 蒸散发拆分

蒸散发( $\delta_{ET}$ )及相关成分通量 $\delta$ 值( $\delta_E$ 及 $\delta_T$ )的准确定量是蒸散发拆分应用的关键。以往,通常用Keeling Plot法(Keeling, 1958),通过大气水汽 $\delta$ 值与大气水汽混合比的倒数关系计算方程截距来估算 $\delta_{ET}$ (Yakir & Sternberg, 2000),但是实际测量时Keeling Plot法的很多假设难以成立。近年来,研究人员借助激光测量技术在 $\delta_{ET}$ 、 $\delta_E$ 及 $\delta_T$ 测量方面开发了一系列新方法。例如,Campbell Scientific的TDLAS激光同位素仪可实现针对同一气体分子的不同同位素异构体(isotopologues,如 $H_2^{18}O$ 和 $H_2^{16}O$ )通量的同时测量;Griffis等(2004)据此进一步发展了“通量比值法”,通过两层或多层梯度廓线技术测量大气水汽轻重同位素组分的梯度计算轻重同位素的比值,最后得到在线原位监测的 $\delta_{ET}$ ;Griffis等(2010)发展出激光同位素仪高频测量和涡度相关法相结合

在线原位监测 $\delta_{ET}$ 的方法, 虽然该方法在计算水汽同位素和垂直风速协方差的时候引入了一些不确定性(Good *et al.*, 2012; Xiao *et al.*, 2018), 但是为冠层同位素分馏过程研究提供了新的视角。以往 $\delta_T$ 的计算基于植物蒸腾的稳态假设, 通过测定处于同位素稳定平衡状态(ISS)的茎秆水 $\delta$ 值代替 $\delta_T$  (Moreira *et al.*, 1997), 但是稳态假设只在正午短时间内能成立(Lee *et al.*, 2007); 在非稳态(NSS)情况下, 则可以用模型来模拟 $\delta_T$ , 如Craig-Gordon模型(Craig & Gordon, 1965), 但是由于无法直接观测或模拟叶片气孔蒸发位点水的 $\delta$ 值, 而无法求解, Dongmann等(1974)在此基础上发展出Dongmann模型, 通过预测叶片气孔蒸发位点水的 $\delta$ 值模拟得到 $\delta_T$ , 考虑到叶片水同位素富集的空间异质性, Farquhar和Lloyd(1993)引入Péclet效应来模拟ISS条件下的 $\delta_T$ , Farquhar和Cernusak (2005)在NSS条件下引入Péclet效应, 进一步提高了模型模拟的精度。Hu等(2014)提出了通过连续测量植物叶片水和茎秆水的 $\delta D$ 值、 $\delta^{18}O$ 值以及含水量变化来计算 $\delta_T$ 的方法, 该方法把植物蒸腾通量看作是进(茎秆水通量)和出(叶片含水量)叶片水随时间变化的总和, 通过同位素质量守恒可以求得 $\delta_T$ 。而土壤蒸发的 $\delta_E$ 主要基于Craig-Gordon模型(Craig & Gordon, 1965), 通过测量土壤蒸发前缘水的 $\delta$ 值、大气水汽 $\delta$ 值和空气相对湿度来模拟估算。新一代方法通过搭建激光同位素仪和气体交换叶室耦合的测量系统可实现叶片蒸腾水汽 $\delta_T$ 的直接、实时测量(Wang *et al.*, 2012)(图1), 这相比通过同位素稳态假设对 $\delta_T$ 进行估算的传统方法来说是显著的进步。类似地, 激光与土壤呼吸室的联用也可以测土壤蒸发的 $\delta_E$ 值, 而更大的叶室则使 $\delta_{ET}$ 的实时测定成为可能。

### 2.3 露水凝结来源拆分

露水主要是由低空近地层大气水汽、土壤蒸发水汽和植物蒸腾水汽在露点温度以下形成的凝露, 其同位素组成主要受3种来源 $\delta$ 值的影响, 但露水冷凝和蒸发的过程也会影响植物叶片水和大气水汽的同位素组成(Kim & Lee, 2011; Wen *et al.*, 2012), 因此要实现三者拆分并不容易, Wen等(2012)研究认为, 低空近地层大气水汽通量向下, 而蒸散(土壤蒸发和植物蒸腾)的水汽通量向上, 可以通过通量廓线法得到生态系统净水汽通量和同位素值( $\delta_n$ ), 通过露水与大气水汽的平衡分馏模型和冠层动力学分

馏模型确定露水的同位素值( $\delta_d$ ), 再用Craig-Gordon模型确定土壤蒸发和植物蒸腾的同位素值, 最后通过同位素质量守恒确定露水凝结不同来源的比例。

### 2.4 降水的水汽来源拆分

同位素瑞利分馏模型可以示踪水汽来源(Dan-sgaard, 1964), 但是剩余水汽占气团的比例难以准确计算, 也没有考虑地表水体蒸发和云下二次蒸发对大气水汽 $\delta$ 值的影响, 只能模拟气团运行过程中分馏系数和气团内水汽含量变化等因素对降水 $\delta$ 值的影响(Gat, 2000)。d-excess因为可以指示水汽源区相对湿度和温度等信息, 也被用于示踪水汽来源(Yamanaka *et al.*, 2002; Pang *et al.*, 2004)。此外,  $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 双同位素结合同位素质量平衡提供了更为简化的估算方法, Peng等(2011)研究认为, 假设降水水汽主要是土壤蒸发水汽、植物蒸腾水汽以及上风向平流输送的水汽混合后的结果, 如果3种来源的水汽混合均匀, 则可以建立一个三元混合模型, 通过上述蒸散发拆分中的方法可以确定土壤蒸发水汽的同位素值( $\delta_{Ev}$ )和植物蒸腾水汽的同位素值( $\delta_{Tr}$ ), 降水的水汽同位素值( $\delta_{pv}$ )用降水同位素值经当地水汽蒸发线校准后计算得到(Gibson & Reid, 2014), 上风向平流输送的水汽同位素值( $\delta_{adv}$ )则可通过风向和两点之间的水汽同位素值得到(Wang *et al.*, 2016)。也有一些研究把降水和水汽同位素引入大气环流模型(Gao *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2015), 从更大尺度上确定水汽来源。

### 2.5 $\delta^{17}O$ 和 $^{17}O$ -excess的应用

氧元素在自然界有3种同位素, 由于 $^{17}O$ 自然丰度变异小且测量精度不够(林光辉, 2013), 以往 $^{17}O$ 在生态系统的研究应用很少。Meijer和Li (1998)通过电解水生成 $O_2$ 首次测量了液态水中的 $\delta^{17}O$ , 并认为由于 $\delta^{17}O$ 和 $\delta^{18}O$ 之间稳定的比例关系(0.528)而不能为生态系统提供更多有效信息。随着研究发现大气中 $O_2$ 的 $^{17}O$ 的非质量相关分馏可以用于光合作用和生物生产力的估算(Luz *et al.*, 1999; Luz & Barkan, 2000; Blunier *et al.*, 2002), d-excess可反演水源区温度和相对湿度信息(Merlivat & Jouzel, 1979; Gat, 1981),  $^{17}O$ -excess可用于恢复水源区相对湿度信息(Angert *et al.*, 2004), 三氧同位素因为能提供更多的生态系统过程信息而在生态学研究中的应用越来越广泛(Bao *et al.*, 2016)。目前水的 $\delta^{17}O$ 的高精度测量主要是通过 $CoF_3$ 将水转化为 $O_2$ , 再通过同位素比率质

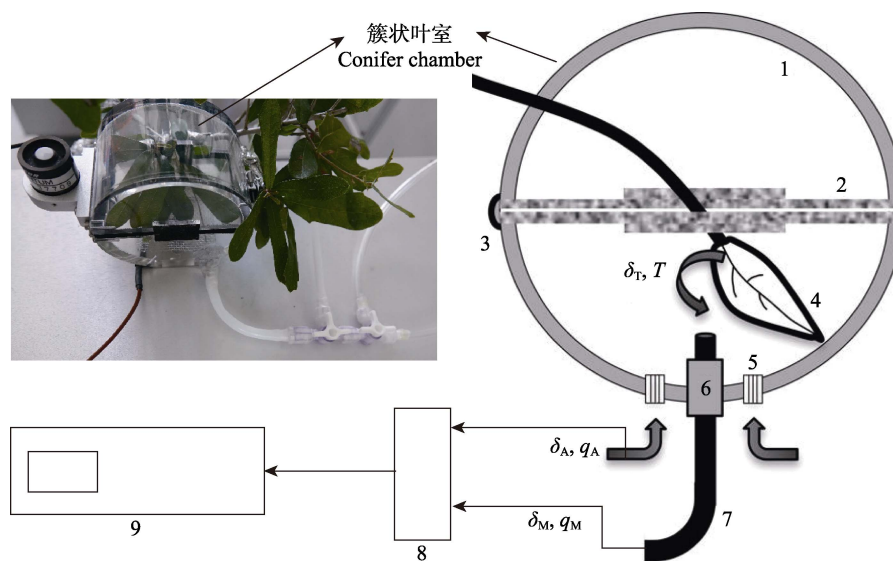
谱仪测量得到(Barkan & Luz, 2005), 也可以通过激光同位素仪实现测量和校准(Steig *et al.*, 2014)。

类似于 d-excess 的概念,  $^{17}\text{O}$ -excess 定义为:  $^{17}\text{O}\text{-excess} = 10^6 \times ((\ln(\delta^{17}\text{O}/1000 + 1) - 0.528 \ln(\delta^{18}\text{O}/1000 + 1)))$ , 由于  $^{17}\text{O}$ -excess 很小, 所以乘以  $10^6$ , 单位为  $10^{-3}\text{‰}$  (per meg), 因为与 d-excess 稍有区别, 也有学者用  $\Delta^{17}\text{O}$  来表示  $^{17}\text{O}$ -excess。Angert 等(2004)首次指出  $^{17}\text{O}$ -excess 主要受蒸发过程的动力学分馏效应影响, 且对蒸发和冷凝位点的温度变化不敏感, 相比于 d-excess 主要受水源区温度和相对湿度影响,  $^{17}\text{O}$ -excess 为恢复水源区单一气象信息奠定了基础。Landais 等(2006)首次在植物蒸腾过程中发现  $\ln(\delta^{17}\text{O} + 1)$  和  $\ln(\delta^{18}\text{O} + 1)$  的斜率与空气相对湿度成反比; Li 等(2017)发现叶片和茎秆水中  $\Delta^{17}\text{O}$  差异显著, 且 d-excess 和  $\Delta^{17}\text{O}$  呈正相关关系; Nehemy 等(2019)研究指出  $^{17}\text{O}$ -excess 可以用于指示激光同位素仪分析水同位素时甲醇和乙醇污染对测量精度的影响。另外  $^{17}\text{O}$ -excess 在水体蒸发(Barkan & Luz, 2005),

极地雪冰(Landais *et al.*, 2008), 季风降水(Landais *et al.*, 2010)等方面均有应用。

### 3 植物叶片水同位素富集及稳定同位素碳水耦合研究

叶片蒸腾不仅是影响土壤-植被-大气水循环的关键环节, 还通过影响光合作用和呼吸作用调节生态系统的碳循环, 因而植物叶片水同位素研究成为生态系统水循环和碳水耦合研究的热点。蒸腾作用富集的  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  可以通过光合作用中的光解水将  $^{18}\text{O}$  信号传递给  $\text{O}_2$  释放到大气中, 使大气  $\text{O}_2$  富集  $^{18}\text{O}$  (Francey & Tans, 1987), 影响大气中  $\text{O}_2$  的  $^{18}\text{O}$  收支; 还可以在气孔内与  $\text{CO}_2$  发生 O 同位素交换, 使气孔重新释放回大气的  $\text{CO}_2$  富集  $^{18}\text{O}$  (Farquhar *et al.*, 1993), 影响大气中  $\text{CO}_2$  的  $^{18}\text{O}$  收支; Barbour 和 Farquhar (2000) 研究发现植物生长过程中合成的有机物的  $^{18}\text{O}$  也受叶片富集的  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  的影响。因而叶片水的同位素富集 ( $\Delta_{\text{lw}}$ ) 现象具有多重生态学意义: 一方面,  $\Delta_{\text{lw}}$  直接影



**图1** 野外环境下簇状叶室与激光同位素仪相连测量蒸腾水汽同位素信号( $\delta_T$ ) (引自 Wang *et al.*, 2012, 有改动)。实际测量中, 空气(水汽浓度为  $q_A$ , 同位素信号为  $\delta_A$ )以一定流速从叶室的进气口(5)进入叶室, 其与从叶室内叶片蒸腾出的水汽( $T$ ,  $\delta_T$ )混合后( $q_M$ ,  $\delta_M$ )以同样的流速从叶室出气口(6)排出。进入叶室的空气以及排出叶室的混合气在经由电磁阀控制的多路控制系统(8)后按设定的测量周期(如4 min一个测量周期)交替通往水汽激光同位素仪(9)进行测量。在  $q_A$ 、 $\delta_A$ 、 $q_M$ 、 $\delta_M$  以及气流流速都被测定的情况下, 通过进出叶室的水汽质量守恒可以计算出蒸腾通量, 再通过同位素质量守恒方程即可计算出  $\delta_T$ 。详细推导过程及注意事项参考 Wang *et al.* (2012)。

**Fig. 1** Measurement of transpiration vapor isotopic signal ( $\delta_T$ ) by connecting conifer chamber with isotope ratio laser spectrometer in the field (cited from Wang *et al.*, 2012 with change). In the measurement, the air (vapor concentration  $q_A$  and isotopic signal  $\delta_A$ ) enter the clustered chamber at a velocity from the inlet (5), mixing with the transpiration vapor from leaves ( $T$ ,  $\delta_T$ ) in chamber, then ( $q_M$ ,  $\delta_M$ ) eject from the outlet (6) at the same flow rate. Passing by a solenoid valve controlled multi-channel system (8), the mixed air is alternately connected to the isotope ratio laser spectrometer (9) in a set measurement period (e.g., a measurement period of 4 min). As  $q_A$ ,  $\delta_A$ ,  $q_M$ ,  $\delta_M$  and flow rate are measured, the transpired vapor flux can be calculated by mass balance between vapor entering and outgoing the chamber, then  $\delta_T$  of transpiration vapor can be calculated by isotopic mass balance equation. More details and derivational processes reference to Wang *et al.* (2012).



响大气水汽的 $\delta$ 值以及大气 $\text{CO}_2$ 及 $\text{O}_2$ 的 $\delta^{18}\text{O}$ , 为在不同时空尺度上评估生态系统碳水耦合循环提供了独特的“同位素视角”; 另一方面,  $\Delta_{\text{lw}}$ 携带植物有机代谢物如纤维素、叶蜡烷烃等的同位素组成的前体信号, 在古气候重建及推测植被对气候变化的响应等研究领域扮演着重要角色(Farquhar *et al.*, 2007)。

### 3.1 叶片水同位素富集的机理研究

有关 $\Delta_{\text{lw}}$ 生理生态调控机制的研究主要围绕Péclet效应和NSS过程展开。Péclet效应描述的是未富集的水源水与气孔蒸发点周围的富集水( $\Delta_{\text{es}}$ ) 在叶片内部混合的过程, 是计算 $\Delta_{\text{lw}}$ 的关键(Farquhar & Lloyd, 1993)。NSS过程指的蒸腾水汽的同位素值与水源同位素值不相等的情况, 野外自然环境下NSS是常态, 因此对其机理的准确理解具有重要现实意义。目前广泛使用的NSS方程是由Farquhar和Cernusak (2005)在Dongmann等(1974)的基础上推导而来。实际操作中, Péclet效应的定量依赖对蒸腾水汽( $\delta_{\text{T}}$ )瞬时值的准确测量(Song *et al.*, 2015a), 而对NSS方程的实验验证需要在稳定叶室环境下对单个叶片 $\delta_{\text{T}}$  (而非 $\Delta_{\text{lw}}$ )时间轨迹进行测量(Song *et al.*, 2015b)。如前文所述, 以激光同位素仪-气体交换测量系统为基础的新方法的发展为准确测定 $\delta_{\text{T}}$ 提供了便利, 因此也为研究Péclet效应及NSS过程提供了技术保障。

### 3.2 基于稳定同位素的碳水耦合研究

基于稳定同位素的碳水耦合研究一般是由叶片尺度逐渐拓展到个体尺度和生态系统尺度。叶片尺度上, 碳酸酐酶(CA)通过催化 $\text{CO}_2$ 水合反应, 使叶片富集的 $\text{H}_2^{18}\text{O}$ 与 $\text{CO}_2$ 发生氧同位素交换, 进而影响 $^{18}\text{O}$ 的平衡程度以及 $\text{CO}_2$ 的 $^{18}\text{O}$ 同位素值; 对该过程的深入理解催生了基于叶片 $\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ 及 $\text{H}_2^{18}\text{O}$ 通量测量估算叶肉细胞导度( $g_{\text{m}}$ , 光合作用的重要参数)新方法的提出(Gillon & Yakir, 2001; Barbour *et al.*, 2016), 同时也为理解水和碳循环以及进行尺度拓展奠定了基础。个体水平上, 碳水耦合研究主要围绕植物水分利用效率(WUE)与植物组织的 $\delta^{13}\text{C}$  (以及 $\delta^{18}\text{O}$ )的关系展开(Farquhar & Richards, 1984)。WUE作为耦合植物个体的固碳能力和水分代谢的生理指标, 在农林作物育种、生理生态响应等研究领域具有重要意义。早年的WUE研究使用 $\delta^{13}\text{C}$ 这个单一的同位素指标, 而近年来, 随着机理研究的深入,  $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 相结合的“双同位素技术”越来越成

为WUE研究的常用工具, 这是因为 $\delta^{18}\text{O}$ 含有叶片水富集过程中记录的气孔导度及叶片蒸腾等“水分”方面的信息, 因而可以和 $\delta^{13}\text{C}$ 结合深入探究WUE变化背后的生理驱动机制, 如光合作用和蒸腾作用对WUE的相对贡献等(Scheidegger *et al.*, 2000)。在生态系统尺度上, 主要利用稳定同位素进行碳水通量耦合研究和生态系统过程的模拟, 陆面过程模型(LSM)是分析陆地生态系统碳水交换的过程中同位素分馏效应的重要工具, Riley等(2002, 2003)基于大叶模型发展出模拟生态系统过程中冠层 $\text{H}_2^{18}\text{O}$ 和 $\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ 通量的同位素机理模型(ISOLSM), Xiao等(2010)基于大叶模型和冠层尺度分馏系数建立了一个模拟大豆(*Glycine max*)生态系统 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}_2$ 氧同位素交换的简单同位素模型(SiLSM)。Griffis等(2011)结合涡度相关法连续监测了一个 $\text{C}_4$ 生态系统 $\text{H}_2^{18}\text{O}$ 和 $\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ 的通量和 $\delta$ 值, 探究了冠层尺度和叶片尺度水合反应平衡和同位素富集机理的差异。Welp等(2011)研究指出, 厄尔尼诺驱动的热带地区水分和降水再分配会增加降水和植物水的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比率, 该信号通过生物圈-大气的气体交换传递给大气 $\delta^{18}\text{O}-\text{CO}_2$ , 基于该原理构建模型确定 $\text{CO}_2$ 与海洋和陆地地表水平衡的总通量, 可以用于估算全球陆地生态系统的总初级生产力(GPP)。

## 4 研究展望

### 4.1 存在的主要问题

从技术和方法层面上看, 生态系统水同位素分析仍然面临一些亟待解决的问题, 如: (1)植物水分来源研究中不时会出现基于氢同位素计算的水源水贡献率与氧同位素的结果不一致的现象, 引起氢氧同位素结果差异的原因是什么? 是否和真空抽提过程中存在的潜在水-纤维素之间的氢交换有关? 抑或是因为氢同位素的平衡分馏系数远大于动力学分馏系数, 而氧同位素的平衡分馏系数与动力学分馏系数相当, 导致两者示踪效果的不同? (2)怎样在野外环境下实现对 $\delta_{\text{T}}$ 或 $\delta_{\text{E}}$ 的无干扰测量, 使其更接近野外真实值? (3)水汽源区相对湿度作为 $^{17}\text{O}$ -excess的唯一控制因子使用存在一定争议, 其他因素和生态过程对 $^{17}\text{O}$ -excess的影响能否忽略或如何量化?  $^{17}\text{O}$ -excess能否为生态系统水循环过程提供更多有用信息? (4)叶片水力性状与Péclet效应有怎样的关联? 怎样把水力学性状的测量整合到

Péclet效应的测量体系中? (5)叶片水的 $^{18}\text{O}$ 与 $\text{CO}_2$ 的 $^{18}\text{O}$ 交换的平衡系数在单叶和冠层尺度是否存在差别? 将叶片尺度水富集研究拓展到生态系统尺度时, 不同时间、空间和生态系统的富集过程及其控制机理是否存在差异?

#### 4.2 前沿方向展望

蒸散发拆分、植物水分来源区分、叶片水同位素富集以及碳水同位素信号在生态系统尺度的耦合仍将是未来较长一段时间内水同位素分析技术聚焦的主要方向。同时, 可以预计生态系统水分 $^{17}\text{O}$ 的测量和应用、植物叶片吸水、根系水力再分配等领域的同位素应用也将逐步走向成熟。

(1)植物水分来源区分。包括: 植物水分利用策略的多样性及对全球变化的响应; 从“同位素生态位”的角度解释干旱或半干旱区物种共存机制; 完善“直接平衡法”等无需抽提步骤的土壤或植物茎叶水分同位素分析的新方法, 进一步提高水同位素分析的效率。

(2)蒸散发拆分。包括: 生态系统冠层蒸腾与土壤蒸发通量比例的季节及年际变化动态规律探讨; 施肥、灌溉等管理措施对农田生态系统水分收支的影响; 建立全方位整合生态系统各组分包括土壤、植物茎叶、水汽同位素的综合性分析方法, 并在此基础上探究环境变化情境下蒸腾和蒸发比例的变化与植物水分来源变化的内在联系。

(3)叶片水富集机理。包括: 完善Péclet效应的测量方法, 建立具备大范围调控不同环境因子的实验体系, 深化Péclet效应对环境梯度响应机制的研究; 逐步由单叶尺度上推至冠层尺度, 建立分析森林和草原等生态系统冠层尺度Péclet效应的相关方法(农田生态系统参考Xiao等(2012))。

(4) $^{17}\text{O}$ 的测量和应用。 $^{17}\text{O}$ 便捷、高精度测量仪器逐步推广应用, 可以同时测量三氧同位素( $\text{d-excess}$ 和 $^{17}\text{O-excess}$ ), 用于反映生态系统水循环过程更多的信息, 深入研究生态系统水分 $^{17}\text{O}$ 的主要影响因素及其控制机制, 明确 $^{17}\text{O-excess}$ 在反演水源区相对湿度时的适用范围及限制条件。

(5)碳水耦合。包括: 同时测量叶片 $\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ 和 $\text{H}_2^{18}\text{O}$ 以区分叶肉细胞导度不同组分以及探究叶片尺度碳水耦合机制;  $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 双同位素技术探究 $WUE$ 变化的生理驱动机制; 探究叶片尺度拓展到个体乃至生态系统尺度时, 碳水耦合过程的差异及其

控制机制。

#### 参考文献

- Aemisegger F, Pfahl S, Sodemann H, Lehner I, Seneviratne SI, Wernli H (2014). Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 4029–4054.
- Angert A, Cappa CD, DePaolo DJ (2004). Kinetic  $^{17}\text{O}$  effects in the hydrologic cycle: indirect evidence and implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 3487–3495.
- Bao HM, Cao XB, Hayles JA (2016). Triple oxygen isotopes: fundamental relationships and applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, 463–492.
- Barbour MM, Evans JR, Simonin KA, Caemmerer S (2016). Online  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  oxygen isotope fractionation allows estimation of mesophyll conductance in  $\text{C}_4$  plants, and reveals that mesophyll conductance decreases as leaves age in both  $\text{C}_4$  and  $\text{C}_3$  plants. *New Phytologist*, 210, 875–889.
- Barbour MM, Farquhar GD (2000). Relative humidity-and ABA-induced variation in carbon and oxygen isotope ratios of cotton leaves. *Plant, Cell & Environment*, 23, 473–485.
- Barkan E, Luz B (2005). High precision measurements of  $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$  and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ratios in  $\text{H}_2\text{O}$ . *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 19, 3737–3742.
- Beyer M, Dubbert M (2019). X Water Worlds and how to investigate them: a review and future perspective on *in situ* measurements of water stable isotopes in soils and plants. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. DOI: 10.5194/hess-2019-600.
- Blunier T, Barnett B, Bender ML, Hendricks MB (2002). Biological oxygen productivity during the last 60,000 years from triple oxygen isotope measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 3. DOI: 10.1029/2001GB001460.
- Cernusak LA, Barbour MM, Arndt SK, Cheesman AW, English NB, Feild TS, Helliker BR, Holloway-Phillips MM, Holtum JAM, Kahmen A, McInerney FA, Munksgaard NC, Simonin KA, Song X, Stuart-Williams H, West JB, Farquhar GD (2016). Stable isotopes in leaf water of terrestrial plants. *Plant, Cell & Environment*, 39, 1087–1102.
- Chapin III FS, Matson PA, Vitousek PM (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer Science & Business Media, New York.
- Craig H (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702–1703.
- Craig H, Gordon LL (1965). Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere/Tongiorgi E. *Proceedings of a Conference on Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Palaeotemperatures*. Spoleto, Italy. 9–130.
- Dansgaard W (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*,

- 16, 436–468.
- Davie T (2008). *Fundamentals of Hydrology*. 2nd ed. Routledge, London.
- Dawson TE, Ehleringer JR (1991). Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 350, 335–337.
- Dongmann G, Nürnberg HW, Förstel H, Wagener K (1974). On the enrichment of  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  in the leaves of transpiring plants. *Radiation and Environmental Biophysics*, 11, 41–52.
- Dubbert M, Werner C (2019). Water fluxes mediated by vegetation: emerging isotopic insights at the soil and atmosphere interfaces. *New Phytologist*, 221, 1754–1763.
- Ehleringer JR, Dawson TE (1992). Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 15, 1073–1082.
- Farquhar GD, Cernusak LA (2005). On the isotopic composition of leaf water in the non-steady state. *Functional Plant Biology*, 32, 293–303.
- Farquhar GD, Cernusak LA, Barnes B (2007). Heavy water fractionation during transpiration. *Plant Physiology*, 143, 11–18.
- Farquhar GD, Lloyd J (1993). *Carbon and Oxygen Isotope Effects in the Exchange of Carbon Dioxide Between Terrestrial Plants and the Atmosphere*. Academic Press, San Diego, USA. 47–70.
- Farquhar GD, Lloyd J, Taylor JA, Flanagan LB, Syvertsen JP, Hubick KT, Wong SC, Ehleringer JR (1993). Vegetation effects on the isotope composition of oxygen in atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Nature*, 363, 439–443.
- Farquhar GD, Richards RA (1984). Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Functional Plant Biology*, 11, 539–552.
- Farris F, Strain BR (1978). The effects of water-stress on leaf  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  enrichment. *Radiation and Environmental Biophysics*, 15, 167–202.
- Fontes JC, Coque R, Dever L, Filly A, Mamou A (1983). Paléohydrologie isotopique de l'Oued el Akarit (sud tunisie) au Pléistocène supérieur et à l'Holocène. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 43, 41–62.
- Francey RJ, Tans PP (1987). Latitudinal variation in oxygen-18 of atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Nature*, 327, 495–497.
- Gao J, Masson-Delmotte V, Yao T, Tian L, Risi C, Hoffmann G (2011). Precipitation water stable isotopes in the south Tibetan Plateau: observations and modeling. *Journal of Climate*, 24, 3161–3178.
- Garratt JR, Segal M (1988). On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. *Boundary-Layer Meteorology*, 45, 209–236.
- Gat JR (1981). *Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Gat JR (2000). Atmospheric water balance—The isotopic perspective. *Hydrological Processes*, 14, 1357–1369.
- Gat JR, Carmi I (1987). Effect of climate changes on the precipitation patterns and isotopic composition of water in a climate transition zone: case of the Eastern Mediterranean Sea area//Sircoulon J. *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources*. IAHS-AISH publication, Oxfordshire, UK. 168, 513–523.
- Genereux D (1998). Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separations. *Water Resources Research*, 34, 915–919.
- Gerlein-Safdi C, Gauthier PPG, Sinkler CJ, Caylor KK (2017). Leaf water  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$  maps show directional enrichment discrepancy in *Colocasia esculenta*. *Plant, Cell & Environment*, 40, 2095–2108.
- Gibson JJ, Reid R (2014). Water balance along a chain of tundra lakes: a 20-year isotopic perspective. *Journal of Hydrology*, 519, 2148–2164.
- Gillon JS, Yakir D (2001). Influence of carbonic anhydrase activity in terrestrial vegetation on the  $^{18}\text{O}$  content of atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Science*, 291, 2584–2587.
- Good SP, Soderberg K, Wang L, Caylor KK (2012). Uncertainties in the assessment of the isotopic composition of surface fluxes: a direct comparison of techniques using laser-based water vapor isotope analyzers. *Journal of Geophysical Research*, 117, D15301. DOI: 10.1029/2011jd017168.
- Griffis TJ, Baker JM, Sargent SD, Tanner BD, Zhang J (2004). Measuring field-scale isotopic  $\text{CO}_2$  fluxes with tunable diode laser absorption spectroscopy and micrometeorological techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 15–29.
- Griffis TJ, Lee X, Baker JM, Billmark K, Schultz N, Erickson M, Zhang X, Fassbinder J, Xiao W, Hu N (2011). Oxygen isotope composition of evapotranspiration and its relation to  $\text{C}_4$  photosynthetic discrimination. *Journal of Geophysical Research*, 116, G01035. DOI: 10.1029/2010JG001514.
- Griffis TJ, Sargent SD, Lee X, Baker JM, Greene J, Erickson M, Zhang X, Billmark K, Schultz N, Xiao W, Hu N (2010). Determining the oxygen isotope composition of evapotranspiration using eddy covariance. *Boundary-Layer Meteorology*, 137, 307–326.
- Holloway-Phillips M, Cernusak LA, Barbour M, Song X, Cheesman A, Munksgaard N, Stuart-Williams H, Farquhar GD (2016). Leaf vein fraction influences the Péclet effect and  $^{18}\text{O}$  enrichment in leaf water. *Plant, Cell & Environment*, 39, 2414–2427.
- Hu ZM, Wen XF, Sun XM, Li LH, Yu GR, Lee XH, Li SG (2014). Partitioning of evapotranspiration through oxygen isotopic measurements of water pools and fluxes in a temperate grassland. *Journal of Geophysical Research*, 119, 358–372.
- Keeling CD (1958). The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochimica*

DOI: 10.17521/cjpe.2019.0204



- et Cosmochimica Acta*, 13, 322–334.
- Kendall C, McDonnell JJ (1998). *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier Science, Netherlands.
- Kim K, Lee X (2011). Transition of stable isotope ratios of leaf water under simulated dew formation. *Plant, Cell & Environment*, 34, 1790–1801.
- Landais A, Barkan E, Luz B (2008). Record of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $^{17}\text{O}$ -excess in ice from Vostok Antarctica during the last 150,000 years. *Geophysical Research Letters*, 35, L02709. DOI: 10.1029/2007GL032096.
- Landais A, Barkan E, Yakir D, Luz B (2006). The triple isotopic composition of oxygen in leaf water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 4105–4115.
- Landais A, Risi C, Bony S, Vimeux F, Descroix L, Falourd S, Bouygues A (2010). Combined measurements of  $^{17}\text{O}$ -excess and d-excess in African monsoon precipitation: implications for evaluating convective parameterizations. *Earth and Planetary Science Letters*, 298, 104–112.
- Lee X, Kim K, Smith R (2007). Temporal variations of the  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  signal of the whole-canopy transpiration in a temperate forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB3013. DOI: 10.1029/2006GB002871.
- Lee X, Sargent S, Smith R, Tanner B (2005). In situ measurement of the water vapor  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  isotope ratio for atmospheric and ecological applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22, 555–565.
- Li SN, Levin NE, Soderberg K, Dennis KJ, Caylor KK (2017). Triple oxygen isotope composition of leaf waters in Mpala, central Kenya. *Earth and Planetary Science Letters*, 468, 38–50.
- Lin GH (2013). *Stable Isotope Ecology*. Higher Education Press, Beijing. 30. [林光辉 (2013). 稳定同位素生态学. 高等教育出版社, 北京. 30.]
- Lin GH, Sternberg LDSL (1993). Hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants/Ehleringer JR, Hall AE, Farquhar GD. *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*. Academic Press, San Diego, USA. 497–510.
- López Días V, Hoang HQ, Martínez-Carreras N, Barnich F, Wirtz T, McDonnell JJ, Pfister L (2019). The use of Nafion membranes to measure  $^2\text{H}/^1\text{H}$  and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  isotopic ratios in water. *Journal of Membrane Science*, 572, 128–139.
- Luz B, Barkan E (2000). Assessment of oceanic productivity with the triple-isotope composition of dissolved oxygen. *Science*, 288, 2028–2031.
- Luz B, Barkan E, Bender ML, Thieme MH, Boering KA (1999). Triple-isotope composition of atmospheric oxygen as a tracer of biosphere productivity. *Nature*, 400, 547–550.
- Meijer HAJ, Li WJ (1998). The use of electrolysis for accurate  $\delta^{17}\text{O}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  isotope measurements in water. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 34, 349–369.
- Merlivat L, Jouzel J (1979). Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 84, 5029–5033.
- Moore JW, Semmens BX (2008). Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. *Ecology Letters*, 11, 470–480.
- Moreira MZ, Sternberg LDSL, Martinelli LA, Victoria RL, Barbosa EM, Bonates LCM, Nepstad DC (1997). Contribution of transpiration to forest ambient vapour based on isotopic measurements. *Global Change Biology*, 3, 439–450.
- Nehemy MF, Millar C, Janzen K, Gaj M, Pratt DL, Laroque CP, McDonnell JJ (2019).  $^{17}\text{O}$ -excess as a detector for co-extracted organics in vapor analyses of plant isotope signatures. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 33, 1301–1310.
- Pang HX, He YQ, Zhang ZL, Lu AG, Gu J (2004). The origin of summer monsoon rainfall at New Delhi by deuterium excess. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 115–118.
- Peng TR, Liu KK, Wang CH, Chuang KH (2011). A water isotope approach to assessing moisture recycling in the island-based precipitation of Taiwan: a case study in the western Pacific. *Water Resources Research*, 47, W08507. DOI: 10.1029/2010WR009890.
- Riley WJ, Still CJ, Helliker BR, Ribas-Carbo M, Berry JA (2003).  $^{18}\text{O}$  composition of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  ecosystem pools and fluxes in a tallgrass prairie: simulations and comparisons to measurements. *Global Change Biology*, 9, 1567–1581.
- Riley WJ, Still CJ, Torn MS, Berry JA (2002). A mechanistic model of  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  and  $\text{C}^{18}\text{OO}$  fluxes between ecosystems and the atmosphere: model description and sensitivity analyses. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 42. DOI: 10.1029/2002GB001878.
- Roden JS, Lin G, Ehleringer JR (2000). A mechanistic model for interpretation of hydrogen and oxygen isotope ratios in tree-ring cellulose. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 21–35.
- Rothfuss Y, Javaux M (2017). Reviews and syntheses: isotopic approaches to quantify root water uptake: a review and comparison of methods. *Biogeosciences*, 14, 2199–2224.
- Rothfuss Y, Vereecken H, Brüggemann N (2013). Monitoring water stable isotopic composition in soils using gas-permeable tubing and infrared laser absorption spectroscopy. *Water Resources Research*, 49, 3747–3755.
- Scheidegger Y, Saurer M, Bahn M, Siegwolf R (2000). Linking stable oxygen and carbon isotopes with stomatal conductance and photosynthetic capacity: a conceptual model. *Oecologia*, 125, 350–357.
- Scrimgeour CM (1995). Measurement of plant and soil water isotope composition by direct equilibration methods. *Journal of Hydrology*, 172, 261–274.
- Song X, Loucos KE, Simonin KA, Farquhar GD, Barbour MM

- (2015a). Measurements of transpiration isotopologues and leaf water to assess enrichment models in cotton. *New Phytologist*, 206, 637–646.
- Song X, Simonin KA, Loucos KE, Barbour MM (2015b). Modelling non-steady-state isotope enrichment of leaf water in a gas-exchange cuvette environment. *Plant, Cell & Environment*, 38, 2618–2628.
- Steig EJ, Gkinis V, Schauer AJ, Schoenemann SW, Samek K, Hoffnagle J, Dennis KJ, Tan SM (2014). Calibrated high-precision  $^{17}\text{O}$ -excess measurements using cavity ring-down spectroscopy with laser-current-tuned cavity resonance. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 2421–2435.
- Swart PK, Sternberg LDSL, Steinen R, Harrison SA (1989). Controls on the oxygen and hydrogen isotopic composition of the waters of Florida Bay, USA. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 79, 113–123.
- Uclés O, Villagarcía L, Moro MJ, Canton Y, Domingo F (2014). Role of dewfall in the water balance of a semiarid coastal steppe ecosystem. *Hydrological Processes*, 28, 2271–2280.
- Volkman THM, Kühnhammer K, Herbstritt B, Gessler A, Weiler M (2016). A method for *in situ* monitoring of the isotope composition of tree xylem water using laser spectroscopy. *Plant, Cell & Environment*, 39, 2055–2063.
- Wang LX, Good SP, Caylor KK, Cernusak LA (2012). Direct quantification of leaf transpiration isotopic composition. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154, 127–135.
- Wang P, Li XY, Wang L, Wu X, Hu X, Fan Y, Tong Y (2018). Divergent evapotranspiration partition dynamics between shrubs and grasses in a shrub-encroached steppe ecosystem. *New Phytologist*, 219, 1325–1337.
- Wang SJ, Zhang MJ, Che YJ, Chen FL, Qiang F (2016). Contribution of recycled moisture to precipitation in oases of arid central Asia: a stable isotope approach. *Water Resources Research*, 52, 3246–3257.
- Wang SJ, Zhang MJ, Chen FL, Che YJ, Du MX, Liu YM (2015). Comparison of GCM-simulated isotopic compositions of precipitation in arid central Asia. *Journal of Geographical Sciences*, 25, 771–783.
- 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.
- Welp LR, Keeling RF, Meijer HAJ, Bollenbacher AF, Piper SC, Yoshimura K, Francey RJ, Allison CE, Wahlen M (2011). Interannual variability in the oxygen isotopes of atmospheric  $\text{CO}_2$  driven by El Niño. *Nature*, 477, 579–582.
- Wen XF, Lee X, Sun XM, Wang JL, Hu ZM, Li SG, Yu GR (2012). Dew water isotopic ratios and their relationships to ecosystem water pools and fluxes in a cropland and a grassland in China. *Oecologia*, 168, 549–561.
- Wen XF, Yang B, Sun XM, Lee X (2016). Evapotranspiration partitioning through *in-situ* oxygen isotope measurements in an oasis cropland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230, 89–96.
- Wershaw RL, Friedman I, Heller SJ, Frank PA (1970). Hydrogen isotopic fractionation of water passing through trees//Hobson GD, Speers GC. *Advances in Organic Geochemistry*. Pergamon Press, Oxford. 55–67.
- White JWC, Cook ER, Lawrence JR, Broecker WS (1985). The D/H ratios of sap in trees: implications for water sources and tree ring D/H ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 237–246.
- Xiao W, Lee X, Griffiths TJ, Kim K, Welp LR, Yu Q (2010). A modeling investigation of canopy-air oxygen isotopic exchange of water vapor and carbon dioxide in a soybean field. *Journal of Geophysical Research*, 115, G01004. DOI: 10.1029/2009JG001163.
- Xiao W, Lee XH, Wen XF, Sun XM, Zhang SC (2012). Modeling biophysical controls on canopy foliage water  $^{18}\text{O}$  enrichment in wheat and corn. *Global Change Biology*, 18, 1769–1780.
- Xiao W, Wei ZW, Wen XF (2018). Evapotranspiration partitioning at the ecosystem scale using the stable isotope method—A review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 346–361.
- Yakir D, Sternberg LDSL (2000). The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange. *Oecologia*, 123, 297–311.
- Yamanaka T, Shimada J, Miyaoka K (2002). Footprint analysis using event-based isotope data for identifying source area of precipitated water. *Journal of Geophysical Research*, 107, D22. DOI: 10.1029/2001JD001187.
- Zimmermann U, Ehhalt D, Münnich KO (1967). Soil-water movement and evapotranspiration: changes in the isotopic composition of the water//Geophysics in Vienna. *Proceedings of the Symposium of Isotopes in Hydrology*. International Atomic Energy Agency, Vienna. 567–585.

特邀编委: 温学发 编辑: 赵航