基于氢氧同位素的不同木材密度植物茎水最短抽提时间*

丁亚丽[1,2,3] 陈洪松[1,2] 杨 静[1,2,3] 聂云鹏[1,2**] 王克林[1,2]

([1]中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; [2]中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100; [3]中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 植物-水分关系是生态水文过程的重要环节,稳定同位素技术的应用极大地扩充了该领域的研究范围,提高了研究精度。但因植物样品的水分抽提费时费力,限制了该技术的应用。本研究以植物茎水抽提为例,采用低温真空蒸馏法,通过分析相同质量不同植物样品在同一时间梯度下水分提取率及基于同位素值的水分抽提时间曲线的变化特征,揭示不同植物茎水的最短抽提时间,并建立最短抽提时间与植物木材密度的相关关系。结果表明,目标植物盐肤木、红背山麻杆和火棘的木材密度分别为0.35、0.55和0.67 g·cm^{-3};质量基本相同(约3 g)的3种植物样品的水分提取率在45 min左右均接近100%;由于水分收集的滞后性,基于同位素值的最短抽提时间分别为不小于45、60和60 min,并随木材密度增大而延长。研究结果指示着建立木材密度与植物茎水最短抽提时间曲线的可能,能有效提高抽提效率。

关键词 植物茎水;氢氧同位素;抽提时间;真空蒸馏;木材密度

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)4-1004-06

The shortest time of plant stem water extraction based on hydrogen and oxygen isotope analysis. DING Ya-li[1,2,3], CHEN Hong-song[1,2], YANG Jing[1,2,3], NIE Yun-peng[1,2**], WANG Ke-lin[1,2] ([1]*Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China*; [2]*Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang* 547100, *Guangxi, China*; [3]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(4): 1004-1009.

Abstract: Plant-water relation is an important part of eco-hydrological process. Its study scope has been greatly expanded with the improved research precision based on the application of stable isotope technique. However, water extraction of plant samples is time-consuming and laborious, which limits the application of this technology. In this study, we used the vacuum distillation method to extract plant stem water from the same quality of samples of different plant species under the same time gradient. The shortest water extraction time was obtained based on the changing characteristics of water extraction rates and stable isotope values of the extracted water. We further tried to establish the correlation between the shortest extraction time and the wood density. The results showed that the wood densities of three target plants, *Rhus chinensis*, *Alchornea trewioides* and *Pyracantha fortuneana*, were 0.35, 0.55 and 0.67 g·cm^{-3}, respectively. In addition, the water extraction rates for these three kinds of plant samples with an equal mass (about 3 g) were roughly close to 100% within 45 min. While based on the isotope analysis of the extracted water, the shortest extraction time for *R. chinensis*, *A. trewioides* and *P. fortuneana* was no less than 45, 60 and 60 min, respectively. The shortest extraction time had a trend to increase with the increase in wood density. These results indicated the probability to establish the

*中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-10)、国家自然科学基金项目(41171187,51379205,31100294)、中国科学院知识创新青年人才领域前沿项目和中国科学院"西部之光"人才培养计划博士项目资助。

**通讯作者 E-mail: nyp@isa.ac.cn

收稿日期: 2013-09-23 接受日期: 2013-12-16

relationship between the wood density and the plant stem water shortest extraction time, which would effectively improve the extraction efficiency.

Key words: plant stem water; hydrogen and oxygen isotope; extraction time; vacuum distillation; wood density.

稳定同位素技术具有示踪、整合和指示等多项功能,正逐渐成为生态学研究中最有效的方法之一(Sidle,1988; Dawson *et al.*, 2002; 林光辉, 2010)。以植物-水分关系的研究为例,稳定同位素技术主要应用于植物水来源的确定(Ehleringer & Dawson, 1992)、植物对降雨变化响应的分析(Schwinning *et al.*,2002)以及植物蒸腾与土壤蒸发的区分(Brunel *et al.*,1997)等方面。在相关研究中,除少数样品(如雨水样品)可直接测定其同位素含量外,大部分样品(如植物、土壤样品等)需先进行水分抽提,才能进行测定。随着基于稳定同位素红外光谱技术(IRIS)设备的出现,其测定速度快、运行成本低的优势,使大量样品的测定成为可能(West *et al.*, 2006; Berman *et al.*,2009; 孟宪菁等,2012)。然而,由于目前样品的水分抽提时间标准多数为 120 min 左右,费时费力,限制了包含大量测试样品的研究项目的开展(West *et al.*,2006; 孙江等,2012)。

样品中水分抽提的方法很多,主要包括低温真空蒸馏法(Wershaw *et al.*,1966)、离心法(Whelan & Barrow,1980)、机械压榨法(White *et al.*,1985)、微量蒸馏法(Turner & Gailitis, 1988)及共沸蒸馏法(Revesz & Woods,1990)。其中,低温真空蒸馏法和共沸蒸馏法是应用最广泛的 2 种抽提方法(West *et al.*, 2006)。有研究认为,低温真空蒸馏法更适合土壤和植物水分的抽提且其提取出的水分更能真实反映样品中的氢氧同位素组成(王涛等,2005; 刘文茹等,2012)。低温真空蒸馏法的基本过程是,在真空系统中,样品中的水分在蒸发作用下形成水汽,而水汽又在收集管中凝结。水汽凝结过程中,收集管中水分同位素值的变化符合瑞利分馏曲线(Ingraham & Shadel,1992)。因此,理论上讲,必须完全抽提出样品中的水分,才能获得未分馏的水分样品。由于不同样品水分抽提需要的时间不同,实际水分抽提过程中一般以所需时间的最大值为准(如 120 min),以保证完全的水分抽提(Vendramini & Sternberg, 2007)。这一方面耗时耗力,另一方面,因抽提时间越长,系统真空度越差,导致系统误差变大。因此,获取不同类型样品的最短水分抽提时间,不仅能够提高抽提效率,同时能够减小误差。目前,植物水分有关的研究在生态学研究中越来越重要,稳定同位素技术和方法在生态、水文和大气等研究的热点与难点问题中的广泛应用,导致相关实验过程中对水分抽提系统的精度和速度有更大的要求(冯建祥等,2013)。各种植物最小水分抽提时间的确定不仅能提高科研效率,还能为进一步的稳定同位素分析等研究提供方便和科学依据。

国内外针对样品最短水分抽提时间的研究相对较少,仅有的部分研究只简单对比分析了不同类型样品最短水分抽提时间的差异。如 West 等(2006)分析了 4 种不同类型样品(植物茎、叶、沙土和粘土)的最短水分抽提时间,认为植物茎水的最短抽提时间为 60 ~ 75 min,叶片需要 20 ~ 30 min,沙土需要 30 min,粘土需要 40 min。该类研究一方面没有交待与最短抽提时间对应的具体样品量的多少;另一方面,以植物茎水的抽提为例,不同植物种因木材密度等的差异,所需最短抽提时间也可能不同,仅用少数几种植物的平均值不足以代替所有植物样品的最短水分抽提时间。

本研究以植物茎水抽提为例,运用低温真空蒸馏法,分析相同质量不同植物样品在同一时间梯度下水分抽提比率及基于同位素值的水分抽提时间曲线的变化特征,揭示各植物种茎水最短抽提时间。同时测定各植物种的木材密度,分析建立茎水最短抽提时间与植物木材密度相关关系的可能。

1 材料与方法

1.1 实验材料

植物样品取自于中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站木连综合试验示范区(24°43′N—24°44′N,108°18′E—108°19′E)。研究区位于中亚热带季风气候区;年均气温 19.9 ℃,极端低温-5.2 ℃,极端高温 38.7 ℃;年均降雨量 1389.1 mm,降水丰富但季节分布不均。本试验选取实验区内同种生境条件下长势良好的 3 种典型木本植物,即火棘、盐肤木和红背山麻杆的植株各 1 株。每株植物采集 12 ~ 15 个茎样品。因同一个枝条的不同部分的茎

水氢氧同位素含量无差异(West *et al.*,2006),所以同种植物的所有茎样品均采自于发育成熟的同一枝条上。采样过程为,将植物非绿色的栓化小枝剪成段(长3~5 cm),每个样品2~3段,迅速去皮后装入采样瓶并现场称重。标准样品瓶质量为9 g,装入样品后为12 g,使得待测的样品为3 g。然后用Parafilm膜密封放入冰盒(约4 ℃),带回实验室后冷冻(低于-20 ℃)保存以待抽提(聂云鹏等,2011)。

1.2 实验方法

本研究测定的木材密度为木材的基本密度,即全干材重量除以饱和水分时木材的体积为基本密度。它的物理意义是,单位生材体积或含水最大体积时,所含木材的实质重量。本研究选用一定质量的3种植物样品采用溢水法测量浸饱和后的体积,然后对样品在70 ℃下烘干至恒重,木材干重与浸饱和后木材体积的比值即为木材密度(Fan *et al.*,2012)。

植物茎水在中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室用低温真空抽提法(Ehleringer *et al.*,2000)抽取,抽提装置如图1所示。抽提水分的基本过程是,先将各组(共5组)收集管和样品管连接好,抽真空,然后卸下样品管,将样品瓶去盖并擦净外壁冷凝水(避免污染)后直接放入样品管。在瓶口处塞入脱脂棉,重新连接好样品管后浸泡在液氮之中(液面高度应超过样品瓶口),持续浸泡约15 min以确保将样品中所有水分冷冻。再次抽真空,若真空度能达到30毫托以下并保持稳定的话,去掉液氮杯。用加热套(一般为95 ℃)加热样品管,促使样品水分蒸发,用液氮冷冻收集管底部,促进水汽凝结。为获取基于同位素的植物茎水最短水分抽提时间,本研究设置一个抽提时间梯度(20~180 min),收集经历不同抽提时间的水分样品。计时起点以收集管开始有水汽凝结为准;到达某一预设抽提时间后,取下收集管并用Parafilm膜密封,待其解冻后将水样转移至2 mL样品瓶4 ℃保存;同时取下样品管并将样品瓶连同样品一起称重,在70 ℃下烘干至恒重。通过样品鲜重与抽提后的样品重量计算提取出水分的量。提取水分的质量均由Mettler-Toledo生产的AB104-S天平测得,质量精度为千分之一,$e=1$ mg,$d=0.1$ mg。抽提出水分的量与样品总含水量的比值即为对应抽提时间的水分抽提比率。

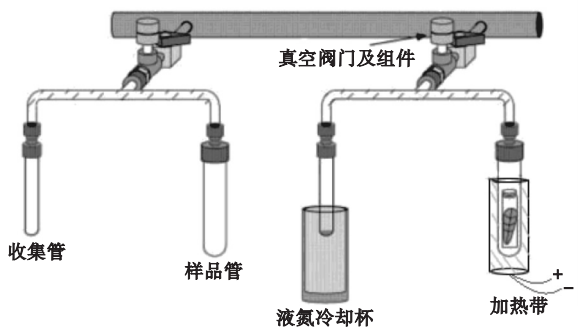


图1 低温真空蒸馏装置结构图(改自West *et al.*, 2006)
Fig. 1 Schematic diagram of the cryogenic vacuum distillation apparatus

所有液态水样品的氢氧同位素含量在中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室采用液态水同位素分析仪(LGR,DLT-100,美国)进行测定。样品同位素值通过下式计算得出:

$$\delta D(\delta^{18}O) = (R_{sample}/R_{standard} - 1) \times 1000‰$$

式中,δD和$\delta^{18}O$分别为对应样品的氢和氧同位素值,R_{sample}和$R_{standard}$分别为样品和国际通用标准物中元素的重轻同位素丰度之比(如$^{18}O/^{16}O$)。δD值的测试误差不超过1‰,$\delta^{18}O$值的测试误差不超过0.2‰(胡可等,2013)。

1.3 数据处理

本文采用Microsoft Excel 2003处理数据,采用MATLAB 7.1软件对数据进行作图分析。

为分析不同类型样品最短水分抽提时间,West等(2006)首次建立基于氢氧同位素值的水分抽提时间曲线,并把它定义为抽提时间与抽提水分同位素值关系的曲线。类似于该方法,本研究以预设的时间梯度为x轴,以抽提出水分的$\delta^2H - \overline{\delta^2H_{\geq T_{min}}}$(‰)和$\delta^{18}O - \overline{\delta^{18}O_{\geq T_{min}}}$(‰)值为$y$轴,得出不同植物茎水抽提时间曲线。$T_{min}$表示样品抽提所需要的最短时间,随后抽提出水分的同位素值不会因抽提时间的延长而增大,可以直接由视觉判断得出。算出不小于最小抽提时间的所有抽提出水分同位素值的平均值,然后用各时间点抽提出水分的同位素值减去该值,得出处理值即为y轴。

2 结果与分析

2.1 不同木材密度的植物在同一抽提时间梯度下水分抽提比率变化特征

实验测得3种植物盐肤木、红背山麻杆和火棘的木材密度分别为0.35、0.55和0.67 g·cm^{-3}。3

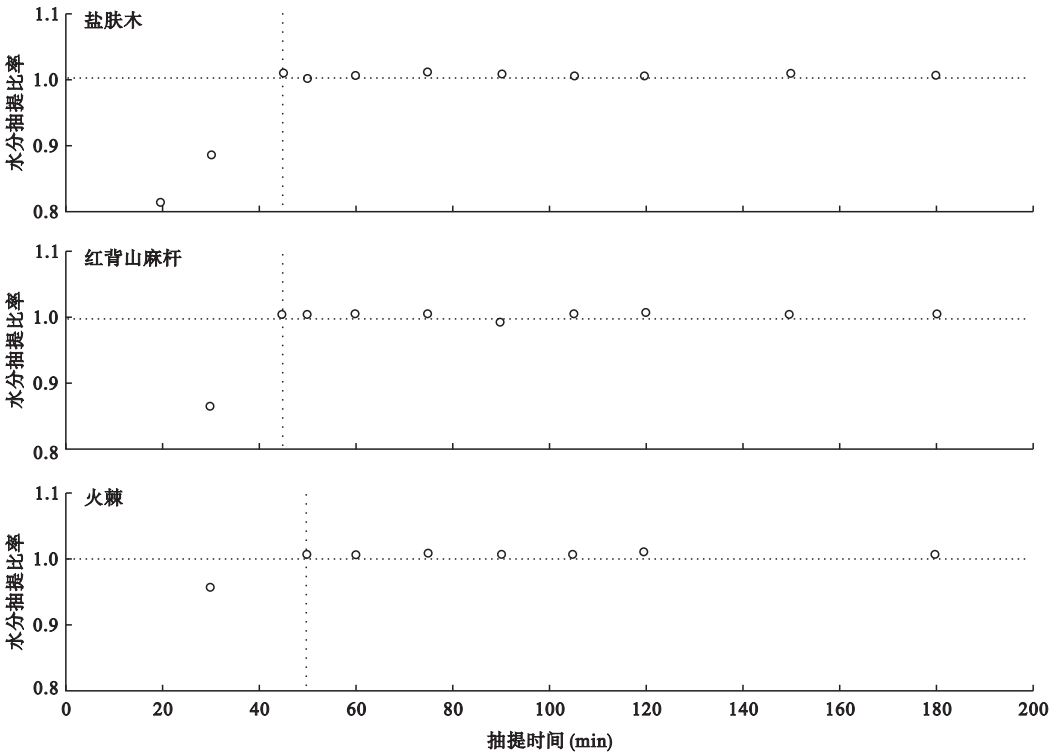


图 2　不同植物茎水在同一时间梯度下水分抽提比率变化特征

Fig. 2　Variation of water extracted ratios for different plant stems across the same time gradient

水平虚线表示抽提比率达到 100% 即完全水分抽提,垂直虚线表示实现完全水分抽提所需的最短抽提时间。

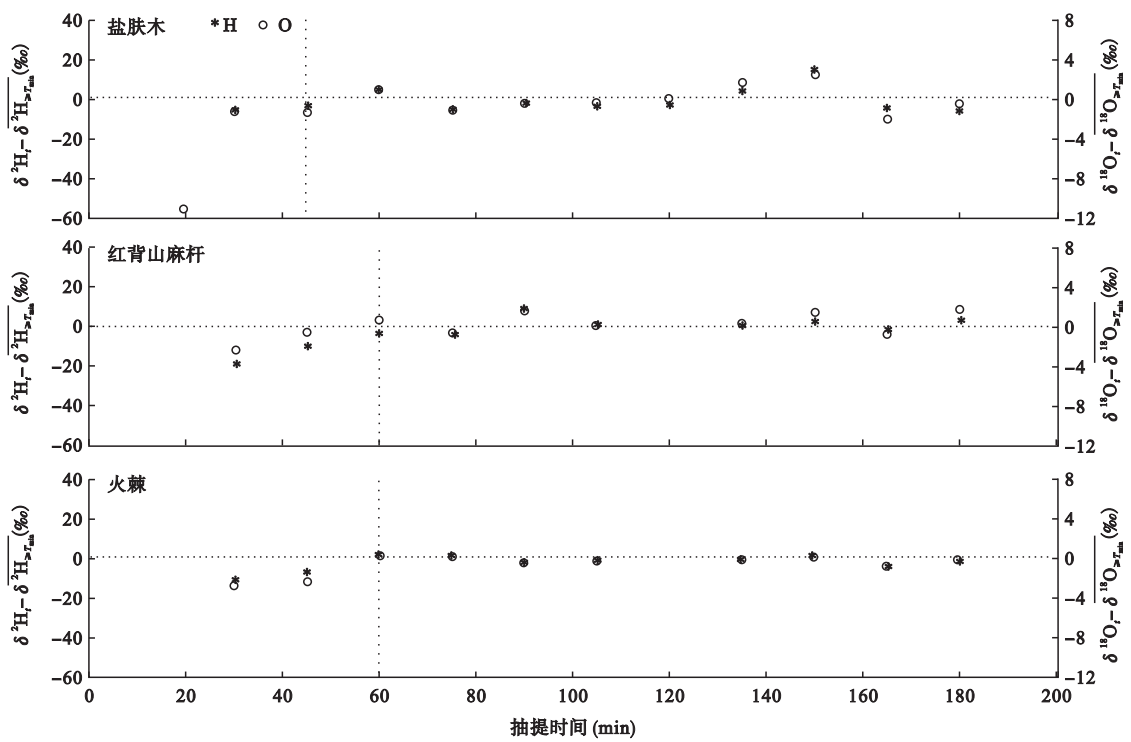


图 3　基于氢氧同位素值不同植物茎水抽提时间曲线

Fig. 3　Extraction timing curves for water extracted from different plant stems based on hydrogen and oxygen isotope values

种植物茎杆含水率差异不大,均在40% ~50%的范围内。由图2可以看出,3种植物的水分抽提比率均随抽提时间延长而上升,直到某一时间变为平稳,不再增加。其中,盐肤木和红背山麻杆两种植物在不同时间梯度条件下,尤其是前期(20 ~45 min),抽提比率变化较为显著。二者变化幅度相似,在20 ~45 min时间内抽提比率以一定幅度增大,此后保持不变,且均在时间为45 min左右达到100%。而火棘达到抽提能力饱和所需时间略长,约为50 min左右达到100%,可能是受到木材密度较大等因素的影响。

2.2 基于氢氧同位素值的不同植物抽提时间

如图3所示,随着抽提时间的增加,3种植物的氢氧同位素处理值均呈现先增大后平缓的规律性变化,显示出与水分抽提比率相似的变化特征。其中,红背山麻杆和火棘的水分抽提曲线变化趋势较为相似,在抽提时间为20 ~60 min内稳定增加,60 min以后呈稳定状态,即最短抽提时间为60 min。盐肤木的水分抽提曲线并未呈现出与前2种植物的类似的规律性变化,而是在30 ~45 min附近即达到稳定(图3)。考虑到水汽冷凝滞后性影响的存在,以及为了保证抽提出的水分足够用于同位素含量的测定,这里选取最短抽提时间的最大值,即不小于45 min。

3 讨论与结论

植物茎水抽提时间曲线结果与West等(2006)植物茎水最短抽提时间为60 ~70 min的结论类似。基于同位素值的最短抽提时间大于基于水分抽提比率的最短抽提时间,这可能与水汽冷凝收集的滞后性有关,因为样品内蒸发出的水汽并不能立即被冷凝收集。盐肤木的水分抽提曲线并未呈现出与前两种植物类似的规律性变化,而是在30 ~45 min附近即达到稳定(图3)。这可能与该类植物木材密度较低,质地较为疏松有关。植物茎木材密度与其水分传导能力等呈负相关关系(Santiago *et al.*, 2004),指示着木材密度越低,水分越容易被抽提。另外,与前2种植物不同的是,基于同位素值的最短抽提时间并不大于基于抽提比率的最短抽提时间,这可能是不需要完全的水分抽提,也能获得不分馏的水分样品的原因(Araguas-Araguas *et al.*, 1995)。

抽提出水分同位素值的处理值达到稳定后,植物水分抽提曲线仍存在一定的波动,尤其是在120 min以后。这可能与抽提出的水样中混入了一些与水分子具有相似光谱吸收峰的有机物质,引起光谱污染有关,并最终导致测定误差增大(West *et al.*, 2010, 2011;Schultz *et al.*,2011;Zhao *et al.*,2011;孟宪菁等,2012)。以盐肤木为例,野外采样过程中发现,乳白色的粘性汁液会沿着新剪开的枝条断面溢出。这类有机物,尤其是持续受热的情况,极有可能随水分一起被蒸发并被冷凝收集。另外,随着抽提时间的延长,系统的真空度会不可避免地降低,进而增大了抽提误差,这也是抽提曲线在后期波动较大的原因。因此,获取植物最短水分抽提时间,不仅能够提高水分抽提效率,同时也能够减小实验误差。

本研究虽以分析植物茎水最短抽提时间与木材密度的关系为核心,但茎水最短抽提时间与植物自身含水率的高低,以及样品量的多少同样关系密切。一般认为,植物茎含水率越高,水分抽提越容易,所需抽提时间越短;样品量越少,需要的抽提时间越短。同时,样品量的多少,一方面与植物茎含水率有关,茎含水率越高,所需样品量越少。另一方面,与上机测定同位素值所需液态水的量有关。以使用激光同位素分析仪(LGR)测定液态水稳定性氢氧同位素含量为例,需要不少于0.5 mL的液态水量(Lis *et al.*, 2008)。因此,为提高抽提效率,在采集同位素样品前,需要先根据植物茎含水率计算所需样品量的最小值。本研究中,3种植物含水率差异不大,均在40% ~50%的范围内,3 g样品所含水量完全能够满足上机测定的需求。采用低温真空蒸馏法抽提植物水分时,要求样品瓶的大小能够直接放入抽提系统中,避免从样品瓶中取出样品再放入抽提系统带来的误差。当植物茎含水率较低时(如某些干旱地区的植物),可能需要将多个样品抽提出的水分混合成一个样品,以满足上机测试的要求,此时,茎水最短抽提时间应该是各样品抽提时间的加和。

综上所述,3种植物的水分抽提比率和抽提得到的水分同位素值均随抽提时间的延长而上升,直到某一时间变为平稳,随后呈稳定状态。质量基本相同(约为3 g)的3种植物盐肤木、红背山麻杆、火棘样品的水分提取比率在45 min均接近100%;由于水汽冷凝收集的滞后性,基于同位素值的最短抽提时间分别为不小于45、60和60 min。最短抽提时间有随木材密度增大而延长的趋势,这指示着建立植物木材密度与茎水最短抽提时间相关关系的可能。另外,由于抽提时间的延长,随水分一起被蒸发冷凝的有机物的影响,以及不同抽提系统和研究对

象的差异,都会不同程度地增大实验误差。因此,在利用基于红外光谱技术的设备测定可能受有机物等杂质影响的水分样品时,需剔除杂质的影响,并针对不同的抽提设备和抽提对象确定所需最短抽提时间,以提高水分抽提系统的精度和速度,为高效深入开展基于稳定同位素分析的相关研究提供支持。

参考文献

冯建祥, 黄敏参, 黄 茜, 等. 2013. 稳定同位素在滨海湿地生态系统研究中的应用现状与前景. 生态学杂志, **32**(4): 1065-1074.

胡 可, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 2013. 桂西北喀斯特峰丛洼地降水氢氧稳定同位素的季节变化特征. 农业工程学报, **29**(5): 53-62.

林光辉. 2010. 稳定同位素生态学:先进技术推动的生态学新分支. 植物生态学报, **34**(2): 119-122.

刘文茹, 沈业杰, 彭新华, 等. 2012. 提取方式对土壤和植物水分提取率的影响及其氢氧同位素分析. 生态学杂志, **31**(7): 1870-1875.

孟宪菁, 温学法, 张心昱, 等. 2012. 有机物对红外光谱技术测定植物叶片和茎杆水 $\delta^{18}O$ 和 δD 的影响. 中国生态农业学报, **20**(10): 1359-1365.

聂云鹏, 陈洪松, 王克林. 2011. 石灰岩地区连片出露石丛生境植物水分来源的季节性差异. 植物生态学报, **35**(10): 1029-1037.

孙 江, 饶文波, 孙 雪, 等. 2012. 新型沙漠土壤水分真空抽提装置的研制与应用. 岩矿测试, **31**(5): 842-848.

王 涛, 包为民, 陈 翔, 等. 2005. 真空蒸馏技术提取土壤水实验研究. 河海大学学报: 自然科学版, **37**(6): 660-664.

Araguas-Araguas L, Rozanskia K, Gonfiantinia R, *et al*. 1995. Isotope effects accompanying vacuum extraction of soil water for stable isotope analyses. *Journal of Hydrology*, **168**: 159-171.

Berman ESF, Gupta M, Gabrielli C, *et al*. 2009. High-frequency field-deployable isotope analyzer for hydrological applications. *Water Resources Research*, **45**: W10201. doi: 10.1029/2009WR008265

Brunel JP, Walker GR, Dighton JC, *et al*. 1997. Use of stable isotopes of water to determine the origin of water used by the vegetation and to partition evapotranspiration: A case study from HAPEX-Sahel. *Journal of Hydrology*, **188-189**: 466-481.

Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH, *et al*. 2002. Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **33**: 507-559.

Ehleringer JR, Dawson TE. 1992. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, **15**: 1073-1082.

Ehleringer JR, Roden J, Dawson TE. 2000. Assessing ecosystem-level water relations through stable isotope ratio analyses// Sala OE, Jackson RB, Mooney HA, eds. Methods in Ecosystem Science. Springer: New York: 181-198.

Fan ZX, Zhang SB, Hao GY, *et al*. 2012. Hydraulic conductivity traits predict growth rates and adult stature of 40 Asian tropical tree species better than wood density. *Journal of Ecology*, **100**: 732-741.

Ingraham NL, Shadel C. 1992. A comparison of the toluene distillation and vacuum/heat methods for extracting soil water for stable isotopic analysis. *Journal of Hydrology*, **140**: 371-387.

Lis G, Wassenaar LI, Hendry MJ. 2008. High-precision laser spectroscopy D/H and $^{18}O/^{16}O$ measurements of microliter natural water samples. *Analytical Chemistry*, **80**: 287-293.

Revesz K, Woods PH. 1990. A method to extract soil water for isotopic analysis. *Journal of Hydrology*, **115**: 397-406.

Santiago LS, Goldstein G, Meinzer FC, *et al*. 2004. Leaf photosynthetic traits scale with hydraulic conductivity and wood density in Panamanian forest canopy trees. *Oecologia*, **140**: 543-550.

Schultz NM, Griffis TJ, Lee XH, *et al*. 2011. Identification and correction of spectral contamination in $^{2}H/^{1}H$ and $^{18}O/^{16}O$ measured in leaf, stem, and soil water. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **25**: 3360-3368.

Schwinning S, Davis K, Richardson L, *et al*. 2002. Deuterium enriched irrigation indicates different forms of rain use in shrub/grass species of the Colorado Plateau. *Oecologia*, **130**: 345-355.

Sidle WC. 1998. Environmental isotopes for resolution of hydrology problems. *Environmental Monitoring and Assessment*, **52**: 389-410.

Turner JV, Gailitis V. 1988. Single-step method for hydrogen isotope ratio measurement of water in porous media. *Analytical Chemistry*, **60**: 1244-1246.

Vendramini PF, Sternberg LSL. 2007. A faster plant stem-water extraction method. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **21**: 164-168.

Wershaw RL, Friedman I, Heller SJ, *et al*. 1966. Hydrogen isotope fractionation of water passing through tree. *Advances in Organic Geochemistry*, 55-67.

West AG, Goldsmith GR, Brooks PD, *et al*. 2010. Discrepancies between isotope ratio infrared spectroscopy and isotope ratio mass spectrometry for the stable isotope analysis of plant and soil waters. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **24**: 1948-1954.

West AG, Goldsmith GR, Matimati I, *et al*. 2011. Spectral analysis software improves confidence in plant and soil water stable isotope analyses performed by isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS). *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **25**: 2268-2274.

West AG, Patrickson SJ, Ehleringer JR. 2006. Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **20**: 1317-1321.

Whelan BR, Barrow NJ. 1980. A study of a method for displacing soil solution by centrifuging with an immiscible liquid. *Journal of Environmental Quality*, **9**: 315-319.

White JWC, Cook ER, Lawrence JR, *et al*. 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.

Zhao LJ, Xiao HL, Zhou J, *et al*. 2011. Detailed assessment of isotope ratio infrared spectroscopy and isotope ratio mass spectrometry for the stable isotope analysis of plant and soil waters. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **25**: 3071-3082.

作者简介 丁亚丽,女,1992 年生,硕士研究生,主要从事生态水文学和稳定同位素生态学方向的研究。E-mail: 2008dingyali@163.com

责任编辑 张 敏