

## 大气水汽稳定同位素组成在生态系统水循环中的应用

王帆<sup>1</sup>, 江洪<sup>1,2</sup>, 牛晓栋<sup>2</sup>

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏南京 210023; 2. 浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江临安 311300)

**摘要:** 水汽稳定同位素组成( $\delta_v$ )可以为水循环研究提供大量有价值的信息。近年来, 稳定同位素红外光谱技术(isotope ratio infrared spectroscopy, IRIS)的发展为获得高时间分辨率的水汽稳定同位素原位测量数据提供了可能。在水汽稳定同位素组成研究取得了巨大进展的同时, 适时对 $\delta_v$ 及其在生态系统水循环应用的研究进展进行综述, 可以为后续研究提供借鉴和参考。从5个方面对水汽稳定同位素组成的研究进行了详述, 分别是: ①水汽稳定同位素分析仪的在线校正; ② $\delta_v$ 的变化规律; ③氘过量的变化特征; ④蒸散发组分的区分; ⑤叶片水<sup>18</sup>O富集的估算。目前水汽稳定同位素的观测站点十分稀少, 尽快建立全球的水汽稳定同位素观测网络并进行长时间的连续观测, 将大大促进生态系统水循环和生态过程解析及其模拟方面的研究。同时, 将稳定同位素在线观测数据和通量观测以及遥感模型结合起来, 可以更好地揭示区域乃至全球水循环模式和机理机制。表1参81

**关键词:** 生态学; 校正; 氘过量; 蒸散发组分; 区分; 叶片水<sup>18</sup>O富集; 水汽稳定同位素组成; 综述

**中图分类号:** S718.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2016)01-0156-10

## Research advances in water vapor isotopic composition and its application in the hydrological research

WANG Fan<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>1,2</sup>, NIU Xiaodong<sup>2</sup>

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** Stable isotope technique provides a great deal of valuable information for the research of the hydrologic cycle, which could also be extensively used in hydrology, aerology, ecology and other related fields. Recent development in absorption spectroscopy technology has made it possible to make in situ, continuous observations of the  $\delta_{18O}$  and  $\delta_D$  of atmospheric water vapor. In this review, the study of water vapor isotope composition were described in detail from 5 aspects. Firstly, we summarized the calibration methods for in situ  $\delta_{18O}$  and  $\delta_D$  measurements made by commercial water vapor isotope analyzers. Secondly, the pattern of water vapor isotope composition were explored. Thirdly, the pattern of deuterium-excess ( $d$ ) was discussed. Fourthly, through surveying a considerable amount of the documents, we found that the plant transpiration dominated local evapotranspiration both in the forest and in the agricultural ecosystems in arid and semi-arid region. Fifthly, the 3 models of estimation of leaf water <sup>18</sup>O enrichment were briefly introduced. As the measurement sites of water vapor isotopic composition are scarce, the establishment of the network and long-term observation will greatly

收稿日期: 2015-03-25; 修回日期: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171324); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110091110028); 科技部国家科技基础条件平台项目(2005DKA32300); 南京大学优秀博士研究生创新能力提升计划B资助项目

作者简介: 王帆, 博士研究生, 从事碳水循环研究。E-mail: pipi870408@163.com。通信作者: 江洪, 教授, 博士, 博士生导师, 从事全球变化和陆地生态系统碳氮水循环等研究。E-mail: jianghong\_china@hotmail.com

benefit the research of ecological hydrologic cycle. Meanwhile, combining the measurement of water vapor isotopic composition with the observation of fluxes and remote sensing models, will further reveal the pattern and mechanism of water cycle at regional and global scale. [Ch, 1 tab. 81 ref.]

**Key words:** ecology; calibration; deuterium-excess; evapotranspiration components; partitioning; leaf water  $^{18}\text{O}$  enrichment; water vapor isotopic composition; review

由于同位素分馏效应的存在,  $^{18}\text{O}$  和  $\text{D}(^2\text{H})$  成为大气、水文和生态等许多学科研究土壤、植被、大气和海洋间不同形式水分运动的最佳示踪剂和重要研究工具<sup>[1-9]</sup>。测定液态和气态水的稳定同位素组成 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  或  $\text{D}/\text{H}$ ) 可以为确定大气水汽来源和理解大气中水汽运动过程提供重要信息。相比于液态水, 气态水在水循环中参与的环节更多, 因此, 气态水数据可以为水分循环研究提供一些液态水数据无法得到的重要启示, 例如气团凝结历程的信息等<sup>[10]</sup>。同时, 描述大气水汽稳定同位素组成 ( $\delta_v$ ) 的时空格局的能力, 也与全球生物地球化学循环中的一些重要科学问题紧密相关, 例如, 大空间尺度的水循环和环流信息等。但是, 受制于传统的收集方法和分析仪器, 大多数已发表的关于  $\delta_v$  的研究都是短期且不连续取样, 仅有的少数数据观测时间较长, 时间分辨率还较低<sup>[11]</sup>, 这使得  $\delta_v$  在理解地球表面与大气之间水汽交换方面的应用潜力不能得到充分的发挥。近年来, 随着稳定同位素红外光谱技术 (isotope ratio infrared spectroscopy, IRIS) 的发展, 研究人员可以得到高时间分辨率的  $\delta_v$  原位连续的观测值, 为进一步全面理解水循环过程提供了可能<sup>[12]</sup>。目前, 商用的激光在线稳定同位素测定仪主要有 3 种: 激光痕量气体分析仪、基于离轴积分腔输出光谱技术的水汽同位素分析仪 (LGR 公司, 美国) 以及基于波长扫描光腔衰荡光谱技术的水汽同位素分析仪 (Picarro 公司, 美国)。虽然商用的激光在线稳定同位素测定仪可以同时获得  $^{18}\text{O}$  和  $\text{D}$  的数据, 但是由于浓度依赖效应的存在, 在进行后续分析之前, 一般要对 IRIS 测量的数据进行校正。因此, 本文首先对水汽稳定同位素分析仪的在线校正进行了详述, 然后对  $\delta_v$  的变化规律及氙过量的变化特征进行了总结。最后对水汽稳定同位素的 2 个重要应用进行了详述, 分别是蒸散发组分的区分及叶片水  $^{18}\text{O}$  富集的预测。

## 1 水汽稳定同位素分析仪的在线校正

WEN 等<sup>[13]</sup>对 IRIS 的校正方法进行了总结, 并将它们分为 3 类。第 1 类为利用露点发生器校正, 第 2 类为利用瞬时蒸发的仪器来校正, 第 3 类方法是在在第 2 类的基础上, 增加 1 个液态水自动进样器。第 2 类方法与第 3 类方法的主要区别是后者可以在没有人为干涉下产生不同样品在不同水汽混合比的标准水汽。WEN 等<sup>[13]</sup>的分类体系中忽略了另一类校正方法, 即利用同位素质谱仪的测量结果进行校正。因此, 本文在 WEN 等<sup>[13]</sup>的基础上, 将 IRIS 的校正方法分为 3 类。第 1 类方法与 WEN 等<sup>[13]</sup>的一样。我们将他们的第 2 种和第 3 种方法合并为一类, 即利用瞬时蒸发的仪器来校正作为第 2 类方法。第 3 类校正方法为利用同位素质谱仪的测量结果进行校正。下面依次介绍这 3 种方法。

### 1.1 利用露点发生器校正

使用露点发生器校正水汽稳定同位素分析仪是基于假设产生的水汽严格遵守 Rayleigh 分馏。这样一来, 产生的  $\delta_v$  便可以通过方程计算得到。计算方程如下:

$$R_v = (R_{l_0}/\alpha) \times ((m_0 - Qt)/m_0)^{(1/\alpha-1)} \quad (1)$$

式(1)中:  $R_v$  为水汽同位素比,  $R_{l_0}$  为标样水的同位素比。  $\alpha$  为分馏系数,  $m_0$  为初始标样水质量 (g),  $Q$  为流速 ( $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $t$  为流逝的时间。

$$Q = (m_0 - m_f)/t_f \quad (2)$$

式(2)中:  $m_f$  为校正结束后标样水的质量,  $t_f$  为整个校正的持续时间。

$$\alpha_H = \exp[24\ 844/(t_d+273)^2 - 76.248/(t_d+273) + 52.612 \times 10^3]; \quad (3)$$

$$\alpha_O = \exp[1\ 137/(t_d+273)^2 - 0.415\ 6/(t_d+273) - 2.066\ 7 \times 10^3] \quad (4)$$

式(3)和式(4)中:  $t_d$  为露点发生器冷凝器中的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

$$\delta_v = (R_v/R_{\text{vsnow}} - 1) \times 1\ 000 \quad (5)$$

式(5)中:  $R_{\text{vsnow}}$  为维也纳标准平均海洋水。对于  $\text{D}/^1\text{H}$ ,  $R_{\text{vsnow}} = 0.000\ 155\ 76$ ; 对于  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $R_{\text{vsnow}} =$

0.002 005 20<sup>[14]</sup>。利用露点发生器进行校正的具体操作过程可参考文献[15]。WANG等<sup>[15]</sup>和SUN等<sup>[16]</sup>都利用该方法对LGR的水汽稳定同位素分析仪进行了校正。该方法主要有2个缺点,一是为了使露点发生器内达到平衡态,要进行12 h以上的静置;二是不能进行长时间的野外在线校正,因为长时间的在线校正需要一个容量足够大的容器,这个在野外原位观测时是不现实的。

### 1.2 利用瞬时蒸发的仪器校正

第2种方法是目前使用最为广泛的方法。通过把稳定同位素组成已知的液态水注射到一个蒸发设备中,由于在蒸发瓶中液态的小水滴瞬间完全蒸发,并没有分馏发生,因此,产生的水汽的稳定同位素组成与液态水的值相同。通过动态的改变液态水和载气的流速,可以产生不同浓度的水汽。LEE等<sup>[11]</sup>和WEN等<sup>[14]</sup>采用1个注射泵和1个蒸发瓶已经成功地校正了激光痕量气体分析仪。IANNONE等<sup>[17-18]</sup>、STRUM等<sup>[19]</sup>利用1个压力注射器来替代注射泵,进行稳定同位素分析仪的校正。压力注射泵由分配头(Microdrop Technologies GmbH, MD-K-130)和驱动电路(MD-E-201)组成。最近,基于此原理,LGR公司和Picarro公司都已经开发了商用的校正仪器,分别为水汽同位素标准源和标样传输模块。众多研究表明,结合商用的校正仪器,可以获得长时间的准确的 $\delta_v$ <sup>[20-24]</sup>。

### 1.3 利用同位素质谱仪的测量结果校正在线测量结果

JOHNSON等<sup>[25]</sup>将IRIS的观测值与同时段收集水汽在同位素质谱仪测量值(isotope ratio mass spectroscopy, IRMS)进行简单的线性拟合,利用拟合后的方程对IRIS观测的同位素D的同位素组成( $\delta_D$ )进行了校正。SUNMONU等<sup>[26]</sup>将IRIS的观测值与IRMS测量值的差值同水汽混合比进行对数拟合,对 $\delta_D$ 的原位观测值进行了长时间的校正。遗憾的是,2人并没有对<sup>18</sup>O的同位素组成( $\delta_{18O}$ )进行校正。

## 2 水汽稳定同位素组成

### 2.1 冷陷-质谱分析

世界气象组织和国际原子能机构在1958年就联合建立了全球降雨同位素网络,并于1961年开始监测洋面、海岸以及内陆降水的同位素组成<sup>[27]</sup>。与降雨相比, $\delta_v$ 的研究相对较少,主要是受收集方法和分析仪器的制约<sup>[28]</sup>。但是,还是有不少学者成功地对 $\delta_v$ 进行了分析,并取得令人瞩目的研究成果。He等<sup>[29]</sup>在1996夏季到秋季,收集分析了美国康涅狄格州中部一处森林上方到3 km大气边界层 $\delta_v$ 。他们发现随着高度的上升, $\delta_v$ 越来越小。ANGERT等<sup>[30]</sup>分析了以色列一站点9 a的数据。该站点月平均 $\delta_{18O}$ 的变化幅度为4‰,最大值出现在7月。他们指出:造成这种季节变化的原因为雨洗效应、温度和相对湿度的季节变化以及大气边界层夹带的季节变化。LAI等<sup>[31]</sup>在美国Wind River站点的观测中发现,夜晚森林中水汽的稳定同位素组成( $\delta_{18O}$ ,  $\delta_D$ )出现分层现象,60 m的同位素组成最大。白天由于湍流混合,没有出现这种分层现象。在晴好的天气下, $\delta_{18O}$ 正午下降, $\delta_D$ 正午上升。作者指出蒸腾增加森林冠层中 $\delta_v$ ,蒸发降低 $\delta_v$ 。大气边界层夹带是早上 $\delta_v$ 变化的主要驱动力,蒸散发是下午 $\delta_v$ 变化的主要驱动力。

### 2.2 在线原位观测

已有的研究结果显示:在季节尺度上, $\delta_v$ 与水汽混合比呈对数-线性关系,表明大部分 $\delta_v$ 的季节变化都可以由Rayleigh分馏来解释<sup>[32-34]</sup>。在天气循环尺度上(几天), $\delta_v$ 变化巨大,经常超过20‰<sup>[32]</sup>。 $\delta_v$ 在日尺度上的变化复杂的多,WELP等<sup>[10]</sup>,LEE等<sup>[32]</sup>和LAI等<sup>[35]</sup>均发现 $\delta_v$ 最小值出现在正午,而LEE等<sup>[36]</sup>在Great Mountain森林则没有观测到任何日变化模式。WEN等<sup>[33]</sup>观测到6月到8月(季风季节),北京的 $\delta_v$ 日变化小于其他季节。这可能是由于季风季节水汽来源相对固定造成的。ZHANG等<sup>[34]</sup>在北京测量结果显示,水汽稳定同位素组成( $\delta_{18O}$ ,  $\delta_D$ )最大值出现在早上,最小值出现在下午。在对石家庄冬小麦*Triticum aestivum*生长季的 $\delta_v$ 的测量中发现, $\delta_v$ 最小值出现在早上,然后其值逐渐增大,直到下午达到最大值。作者指出之所以出现这2种不同的变化模式,主要石家庄测量站点除了和北京站点一样受到边界层夹带的影响外,还同时受植被蒸散发的影响。可见, $\delta_v$ 在日尺度上的变化主要取决于局地因素,包括热环流、边界层的生消和蒸散发、露水等。除了时空分布, $\delta_v$ 还有一些其他特征值得我们关注。例如当降雨时, $\delta_v$ 与降水到达平衡态,降雪时由于与水汽交换不足(过慢), $\delta_v$ 与降雪没有到达平衡态<sup>[32]</sup>。

通过以上研究,可以发现 $\delta_v$ 的4个主要分布特征:①在大气边界层和自由大气之间,随着高度的上升, $\delta_v$ 逐渐降低。②在季节尺度上, $\delta_v$ 与水汽混合比呈对数-线性关系,表明大部分的 $\delta_v$ 的季节变化

都可以由 Rayleigh 分馏来解释。③季风季节时,  $\delta_v$  日变化小于其他季节变化小。④降雨时, 特别是降雨量相对较大时, 水汽与降水达到平衡态。但是, 降雪时由于与水汽交换不足,  $\delta_v$  与降雪没有到达平衡状态。

### 3 氘过量

氘过量( $d=\delta_D-8\times\delta_{18O}$ ), 是由 DANSGAARD 于 1964 年提出的。自提出后, 氘过量便当做 1 个示踪指标, 用来确定水汽的来源和水分循环过程<sup>[37]</sup>。水汽稳定同位素分析仪可以同时测量  $\delta_D$  和  $\delta_{18O}$ , 使得研究者可以更好地研究氘过量。一些学者相继发现海洋上的  $d$  与相对湿度( $h_R$ )存在显著的负相关关系<sup>[3,7]</sup>。虽然陆地下垫面比海洋下垫面复杂, 但是  $d$  与  $h_R$  显著的负相关关系同样存在<sup>[33,38-39]</sup>。除了  $d$  与  $h_R$  的关系外,  $d$  的日变化、季节变化和垂直分布, 也受到了学者的广泛关注。LAI 等<sup>[31]</sup>在美国 Wind River 站点的原始针叶林的观测中发现氘过量早上最低, 正午最高。作者认为自由大气与大气边界层的混合夹带是早上  $\delta_v$  变化的主要驱动力, 蒸散是下午  $\delta_v$  变化的主要驱动力。WELP 等<sup>[38]</sup>分析了 37°~44°N 共 6 个站点的稳定同位素数据, 包括 2 个城市站点<sup>[32-33]</sup>, 2 个农业站点<sup>[40-41]</sup>, 1 个森林站点<sup>[42]</sup>和 1 个草地站点<sup>[41]</sup>。他们发现所有站点 6-8 月的氘过量( $d$ )都是在正午时最大。因为只有美国的纽黑文和北京的观测超过 1 a, 作者只对这 2 个地方的观测结果进行了季节分析, 发现氘过量夏季最小, 这与 JOCAB 等<sup>[43]</sup>在德国海德堡以及 ANGERT 等<sup>[30]</sup>在以色列雷霍沃特的测量结果一致。北京夏季 10 d 平均的氘过量相对纽黑文变化较小, 主要是受季风控制, 水汽来源相对固定。RAMBO<sup>[39]</sup>在 LAI 等<sup>[31]</sup>观测的同一地点进行了 37 d 的在线原位观测。他发现在空气湿度未饱和时,  $d$  值存在明显的垂直梯度, 60 m 处的  $d$  在 1 d 中始终大于 1 m 处  $d$  的值。同时他还指出在空气湿度未饱和时,  $d$  在晚上最小, 正午最大, 早上和下午值介于中间, 但是变化速率大。下雨时,  $d$  的日变化较小。与 LAI 等<sup>[35]</sup>采用同位素质量平衡模型不同, RAMBO<sup>[44]</sup>采用的是 Craig-Gordon 模型来计算蒸散发(ET)的稳定同位素组成。因为在涡度观测中, 夜晚的 ET 通常设定为 0, 所以 LAI 等计算的  $d_{ET}$  也是 0。而 RAMBO 采用的模型计算的夜晚  $d_{ET}$  为负值, 与  $d$  的分布模式一致, 因此 RAMBO 指出只用 ET 就可以解释  $d$  的日变化。但是, 他并没有否认大气夹带可能会影响  $d$  的值。

总结以上研究成果, 可以发现氘过量的 3 个特征: ① $d$  与  $h_R$  存在显著的负相关关系; ② $d$  在 1 d 中, 正午最大; ③ $d$  在 1 a 中, 夏季最小。

### 4 区分蒸散发组分

地表蒸散是生态系统水分循环的一个重要过程, 它与陆地植被的总生态系统生产力高度相关<sup>[45]</sup>。同时, 地表蒸散还在维持陆面水分平衡、地表能量平衡中起着重要作用。因此, 准确地估算生态系统地表蒸散通量在水循环研究中是非常重要的。传统的方法是采用微气象方法, 如涡度相关法或者 Bowen 比率<sup>[46]</sup>。这些方法最大的缺陷就是无法将其组成成分植物蒸腾和土壤蒸发区分开来, 进而限制了对生态系统的水汽交换过程的进一步理解。最近, KOOL 等<sup>[47]</sup>对区分 ET 组分的方法进行了详细的综述, 具体方法包括同位素法、相关性分割方法以及 ET 分割模型。与 KOOL 等的研究不同, 本文只对采用稳定同位素方法区分 ET 的文献进行了总结。稳定同位素方法是基于质量守恒方程, 利用:

$$F_T = (\delta_{ET} - \delta_E) / (\delta_T - \delta_E) \quad (6)$$

可以求出植物蒸腾在总的蒸散发中所占的百分比<sup>[4,9]</sup>。式(6)中:  $\delta_{ET}$ ,  $\delta_E$ ,  $\delta_T$  分别为蒸散、蒸腾和蒸发水汽的稳定同位素组成,  $\delta_{ET}$  可以由 Keeling Plot 直线在  $y$  轴的截距获得<sup>[48-49]</sup>,  $\delta_E$  的计算采用 Craig-Gordon 模型,  $\delta_T$  可以假设植物蒸腾处于同位素稳态, 蒸腾所产生水汽的稳定同位素组成与植物茎水的稳定同位素组成相等; 也可以通过叶片水同位素组成模型结合 Craig-Gordon 模型来估算非稳态下的  $\delta_T$ <sup>[10,50-52]</sup>; 随着技术的发展, 现在直接可以测量  $\delta_T$ <sup>[53]</sup>。利用 Keeling Plot 方法区分生态系统中蒸散发水汽的具体来源时, 必须基于 2 个假设: 一是造成系统中水汽减少的原因只有湍流混合, 系统中不发生冷凝; 二是水汽的来源不超过 2 个, 并且它们的稳定同位素组成有明显差别<sup>[4]</sup>。现有测量结果发现, 土壤蒸发水汽与植物蒸腾水汽的稳定同位素组成有显著差异。

同位素稳态假设在低矮植被中, 如农作物, 果树中应用广泛<sup>[9,54-55]</sup>。基于同位素稳态假设来区分森林地表蒸散发组分的研究目前并不多见。主要原因为相对于植物源水,  $\delta_T$  并不是处于同位素稳态, 特别在

夜晚和蒸腾速率低的时期, 偏离稳态是比较大的<sup>[36]</sup>。MOREIRA 等<sup>[56]</sup>估算了亚马逊流域 2 个不同地点(季节性热带雨林和常年湿润热带雨林)植物蒸腾和土壤蒸发对于大气水汽的贡献率。LAI 等<sup>[35]</sup>计算出了西北太平洋地区一处原始针叶林的叶片水的周转时间约为 11 h, 这么长的周转时间表明植物蒸腾有可能并不处于同位素稳态, 因此作者指出在森林水循环中, 一定要考虑蒸腾的非稳态。但是并非没有基于同位素稳态假设来区分森林地表蒸散组分的研究。YEPEZ 等<sup>[57]</sup>指出对于  $^{18}\text{O}$ , 在稳定的环境条件下(如饱和和水汽压差 VPD 相对稳定时), 短期  $\delta_T$  偏离茎水的同位素组成的值通常在 1‰~3‰, 相对于高度分馏的  $\delta_E$ , 这个值是很小的。因此, 对于区分蒸散通量的影响是很小的。

#### 4.1 应用实例

本文对采用稳定同位素技术和 Keeling Plot 方法区分植被生态系统蒸散组分的部分文献进行了总结(表 1)。表 1 中可以发现: 整个生态系统蒸散绝大部分是由植物蒸腾产生的, 土壤蒸发所占的比例相当小, 最多也只有 35%。这可能与研究区的气候有关。上述实例中, 研究区都属于干旱半干旱气候。在干旱半干旱地区把蒸散划分为植物蒸腾和土壤蒸发是很有必要的。首先, 该地区生态系统的动态演替主要取决于植物水分利用效率, 而估算景观尺度上的植物水分利用效率必须用到植物蒸腾<sup>[58]</sup>; 其次, 计算蒸腾和蒸发的相对量对于解决该地区水循环和生物地球化学循环耦合中的不确定因素起到决定性作用<sup>[59-60]</sup>。从表 1 中植物蒸腾对整个生态系统蒸散的贡献率上, 可以看出在干旱半干旱气候区中, 植物蒸腾在整个生态系统蒸散中扮演者举足轻重的作用。

表 1 蒸腾对整个生态系统蒸散的贡献率

Table 1 Fractional contribution of transpiration to total ecosystem evapotranspiration (ET)

参考文献	植被类型	稳定同位素	蒸腾对整个生态系统蒸散的贡献率/%	时间
[54]	农作物(小麦 <i>Triticum aestivum</i> )	$^{18}\text{O}$	96.5~98.5	1994-02-18-02-20
[57]	豆科 Leguminosae 灌木及下层植被	$^{18}\text{O}$	88.0	2001-09-22
[8]	果树(橄榄树 <i>Olea europaea</i> )	D	69.0~86.0	2002-10-27-11-11
[52]	豆科灌木及下层植被	$^{18}\text{O}$	65.0~100	2002-06-16-10-09
[55]	农作物(冬小麦)	$^{18}\text{O}$	94.0~99.0	2008-04-06-05-01
[58]	植被覆盖 25%~100%的豆科灌木	D	61.0~83.0	2008-09-10
[61]	农作物(玉米 <i>Zea mays</i> )	$^{18}\text{O}$	71.0~88.0	2011-06-26-08-27
[16]	橡树 <i>Quercus robur</i> 林	$^{18}\text{O}$	85.4~91.2	2010-09-11-09-20

#### 4.2 存在问题

在文献查阅过程中, 我们发现制约着区分植被生态系统蒸散组分最大限制在于植物蒸腾同位素稳态假设到底成立与否, 以及如果植物蒸腾处于非稳态, 如何估算非稳态条件下  $\delta_T$ 。HARWOOD 等<sup>[62]</sup>指出: 热带阔叶林蒸散产生的水汽的稳定同位素组成, 早上低于茎水的稳定同位素组成, 下午相反。YAKIR 等<sup>[4]</sup>发现植物只是接近同位素稳态, 植物蒸腾所产生的水汽的稳定同位素比值在早上和午后还是与茎中水的稳定同位素比值有所偏差。LAI 等<sup>[35]</sup>分别采用同位素稳态模型(Craig-Gordon 模型)和同位素非稳态模型(Dongmann 模型)分别计算了西北太平洋地区一处原始针叶林的叶片水的稳定同位素比值, 并分别将 2 个模型得到的叶片水的稳定同位素比值代入到 Flanagan 模型中, 计算了蒸腾所产生的水汽的稳定同位素比值。通过进一步计算其通量, 作者发现基于森林处于同位素稳态假设会高估蒸腾的稳定同位素通量, 继而影响整个冠层水汽的稳定同位素比值。因此, 作者指出在森林水循环中, 使用稳定同位素时, 一定要考虑蒸腾的非稳态假设。袁国富等<sup>[55]</sup>发现在 2 种情况下不能采用稳态假设来获取  $\delta_T$ : 一是作物水分胁迫比较严重; 二是作物进入成熟期, 生理活动发生明显改变。

### 5 叶片水 $^{18}\text{O}$ 富集的预测

由于动力分馏和平衡分馏, 植物的蒸腾作用使得  $^{18}\text{O}$  逐渐在叶片水中富集。富集的叶片水  $^{18}\text{O}$  信号会传递给光合作用释放的氧气和从气孔扩散出的二氧化碳, 因此, 叶片水  $^{18}\text{O}$  富集对生物圈和大气圈  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$  和  $\text{O}^{18}\text{O}$  的交换有着重要影响<sup>[63-66]</sup>。同时, 叶片水  $^{18}\text{O}$  富集在古气候重建中也发挥着重要作用。高时间分辨率的  $\delta_v$  的连续观测, 极大地提高了植物叶片水  $^{18}\text{O}$  富集的预测能力。常用的估算叶片水

$^{18}\text{O}$  富集模型有 3 个, 分别是 CRAIG 和 GORDON 于 1965 年提出的模型(C-G 模型), DONGMANN 等 1974 年改进的模型(D 模型)和 FARQUHAR 和 CERNUSAK 于 2005 年发展的模型(F-C 模型)。为了得到 C-G 模型的闭合形式, 该模型引入了 3 个假设。分别是蒸腾的  $\delta_{180}$  等于茎水  $\delta_{180}$ ; 叶片水含量为常数; 整个叶片为一个混合良好的水库。相比于 C-G 模型, D 模型只是去掉了稳态的假设<sup>[67]</sup>。F-C 模型在预测叶片水  $^{18}\text{O}$  富集时, 没有做上述假设, F-C 模型认为, 整个叶片的稳定同位素组成并不是均匀分布的,  $\delta_{180}$  在叶片的蒸发处最高, 在接近木质部的地方最小<sup>[68-69]</sup>。从木质部到叶片蒸发处逐渐的  $^{18}\text{O}$  富集, 产生了一个同位素梯度, 使得  $^{18}\text{O}$  的扩散方向与蒸腾运输过程的方向相反, 这个现象称为 Péclet 效应<sup>[66]</sup>。F-C 模型在计算叶片水  $^{18}\text{O}$  富集时, 将 Péclet 效应也考虑在其中。下面简单介绍下这 3 个模型的计算方式。

C-G 模型:

$$\delta_{l,b}^s = \delta_x + \varepsilon_{eq} + \varepsilon_k + h(\delta_a - \varepsilon_k - \delta_x) \quad (7)$$

式(7)中:  $\delta_{l,b}^s$  为稳态下叶片水  $^{18}\text{O}$  富集,  $\delta_x$  为木质部水的稳定同位素组成,  $\varepsilon_{eq}$  为平衡分馏系数<sup>[70]</sup>,  $\varepsilon_k$  为动力分馏系数<sup>[71-72]</sup>, 而  $h$  为叶片温度条件下的大气相对湿度。 $\delta_a$  为大气的稳定同位素组成。

D 模型:

$$\delta_{l,b} = \delta_{l,b}^s + [\delta_{l,b}^0 - \delta_{l,b}^s] e^{-d\tau} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{W r_i \alpha_k \alpha_{eq}}{w_i} \quad (9)$$

式(8)中:  $\delta_{l,b}$  和  $\delta_{l,b}^s$  分别是非稳态和稳态下的叶片水  $^{18}\text{O}$  富集,  $\delta_{l,b}^0$  是初始时  $\delta_{l,b}$  的值,  $W$  是叶片水含量,  $r_i$  是水汽扩散总的阻力,  $\alpha_k$  是扩散分馏系数( $\alpha_k = 1 + \varepsilon_k / 1000$ ),  $\alpha_{eq}$  是平衡分馏系数的另外一种表达方式,  $w_i$  是细胞间水汽的摩尔分数。

F-C 模型:

$$\delta_{l,b} = \delta_{l,b}^s - \frac{\alpha_k \alpha_{eq} r_i}{w_i} \cdot \frac{1 - e^{-P}}{P} \cdot \frac{d[W \cdot (\delta_{l,b} - \delta_x)]}{dt} \quad (10)$$

$$\delta_{l,e} = \delta_{l,e}^s - \frac{\alpha_k \alpha_{eq} r_i}{w_i} \cdot \frac{d[W \cdot \frac{1 - e^{-P}}{P} \cdot (\delta_{l,e} - \delta_x)]}{dt} \quad (11)$$

式(10)和式(11)中:  $P$  为 PÉCLET 常数,  $\delta_{l,e}$  是叶片的蒸发处的稳定同位素组成值。当  $P$  趋于 0 时,  $\delta_{l,e} = \delta_{l,b}$ , 及整个叶片为一个混合良好的水库。此时如果叶片水含量也为常数, F-C 模型就和 D 模型完全一样了。

## 6 研究展望

目前,  $\delta_v$  的原位连续观测研究才刚刚起步, 全球已报道的大气水汽  $\delta_D$  和  $\delta_{180}$  连续观测也仅限于 13 个站点, 其中 7 个站点下垫面无植被, 包括美国纽黑文<sup>[32]</sup>, 中国北京<sup>[33-34]</sup>, 日本札幌<sup>[26]</sup>, 美国圣地亚哥<sup>[73]</sup>, 美国莫纳罗亚<sup>[74-75]</sup>, 格陵兰冰盖<sup>[76]</sup>和智利查南托高原<sup>[77]</sup>; 6 个站点下垫面有植被, 包括美国 Great Mountain 森林<sup>[32, 36]</sup>, 美国 Wind River 试验林<sup>[39]</sup>, 美国 Manitou 试验林<sup>[78]</sup>, 美国罗斯蒙特的一个大豆观测站点<sup>[10, 40, 79]</sup>, 中国栾城冬小麦-玉米观测站点<sup>[80-81]</sup>和中国多伦草场<sup>[80]</sup>。尽快建立类似于国际通量观测研究网络(FLUXNET)以及全球降雨同位素网络(GNIP)的全球的水汽稳定同位素观测网络, 3 种观测数据的相互补充将大大促进生态系统水循环和生态过程解析及其模拟方面的研究。

同时, 将稳定同位素在线观测数据和通量观测以及遥感模型结合起来, 能够进一步验证和改进遥感模型, 进而可以更好地揭示区域乃至全球水循环空间分布和机理机制。例如目前验证 MODIS ET 产品主要是用通量数据, 很少有研究直接验证蒸散发(ET)的组分, 土壤蒸发和植物蒸腾的遥感估算精度。如果结合稳定同位素数据, 便可以计算出土壤蒸发和植物蒸腾的绝对量, 进而验证和改进 MODIS ET 组分的算法, 进而提高遥感估算 ET 的精度。

## 7 参考文献

- [1] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702 - 1703.
- [2] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus A*, 1964, **16**(4): 436 - 468.
- [3] GAT J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1996, **24**(1): 225 - 262.

- [4] YAKIR D, da STERNBERG L S L. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange [J]. *Oecologia*, 2000, **123**(3): 297 – 311.
- [5] JOUZEL J, HOFFMANN G, KOSTER R D, *et al.* Water isotopes in precipitation: data/model comparison for present-day and past climates [J]. *Quaternary Sci Rev*, 2000, **19**(1): 363 – 379.
- [6] UEMURA R, MATSUI Y, YOSHIMURA K, *et al.* Evidence of deuterium excess in water vapor as an indicator of ocean surface conditions [J]. *J Geophys Res Atm*, 2008, **113**(D19): D19114. doi:10.1029/2008JD010209.
- [7] GRIFFIS T J. Tracing the flow of carbon dioxide and water vapor between the biosphere and atmosphere: A review of optical isotope techniques and their application [J]. *Agric For Meteorol*, 2013, **174**: 85 – 109.
- [8] WILLIAMS D G, CABLE W, HULTINE K, *et al.* Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques [J]. *Agric For Meteorol*, 2004, **125**(3/4): 241 – 258.
- [9] WELP L R, LEE X H, KIM K, *et al.*  $\delta^{18}\text{O}$  of water vapour, evapotranspiration and the sites of leaf water evaporation in a soybean canopy [J]. *Plant Cell Environ*, 2008, **31**(9): 1214 – 1228.
- [10] HE Hui, LEE X, SMITH R B. Deuterium in water vapor evaporated from a coastal salt marsh [J]. *J Geophys Res Atm*, 2001, **106**(D11): 12183 – 12191.
- [11] LEE X H, SARGENT S, SMITH R, *et al.* In situ measurement of the water vapor  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  isotope ratio for atmospheric and ecological applications [J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2005, **22**(5): 555 – 565.
- [12] 牛晓栋, 江洪, 王帆. 天目山森林生态系统大气水汽稳定同位素组成的影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(3): 327 – 334.  
NIU Xiaodong, JIANG hong, WANG Fan. Stable isotope composition for atmospheric water vapor in the forest ecosystem of Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2015, **32**(3): 327 – 334.
- [13] WEN Xuefa, LEE X H, SUN Xiaomin, *et al.* Intercomparison of 4 commercial analyzers for water vapor isotope measurement [J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2012, **29**(2): 235 – 247.
- [14] WEN Xuefa, SUN Xiaomin, ZHANG Shichun, *et al.* Continuous measurements of water vapor D/H and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  isotope ratios in the atmosphere [J]. *J Hydrol*, 2008, **349**(3/4): 489 – 500.
- [15] WANG Linxin, CAYLOR K K, DRAGONI D. On the calibration of continuous, high precision  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  measurements using off-axis integrated cavity output spectrometer [J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2009, **23**(4): 530 – 536.
- [16] SUN Shoujia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, *et al.* Partitioning oak woodland evapotranspiration in the rocky mountainous area of North China was disturbed by foreign vapor, as estimated based on non-steady-state  $^{18}\text{O}$  isotopic composition [J]. *Agric For Meteorol*, 2014, **184**: 36 – 47.
- [17] IANNONE R Q, ROMANINI D, KASSI S, *et al.* A microdrop generator for the calibration of a water vapor isotope ratio spectrometer [J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2009, **26**(7): 1275 – 1288.
- [18] IANNONE R Q, ROMANINI D, CATTANI O, *et al.* Water isotope ratio ( $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) measurements in atmospheric moisture using an optical feedback cavity enhanced absorption laser spectrometer [J]. *J Geophys Res Atm*, 2010, **115**: D10111. doi: 10.1029/2009JD012895.
- [19] STURM P, KNOBL A. Water vapor  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy [J]. *Atmos Meas Technol*, 2010, **3**(1): 67 – 77.
- [20] GUPTA P, NOONE D, GALEWSKY J, *et al.* Demonstration of high-precision continuous measurements of water vapor isotopologues in laboratory and remote field deployments using wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy (WS-CRDS) technology [J]. *Rapid Commun, Mass Spectrom*, 2009, **23**(16): 2534 – 2542.
- [21] SCHMIDT M, MASEYK K, LETT C, *et al.* Concentration effects on laser-based  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  measurements and implications for the calibration of vapour measurements with liquid standards [J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2010, **24**(24): 3553 – 3561.
- [22] TREMOY G, VIMEUX F, CATTANI O, *et al.* Measurements of water vapor isotope ratios with wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy technology: new insights and important caveats for deuterium excess measurements in tropical areas in comparison with isotope-ratio mass spectrometry [J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2011, **25**(23): 3469 – 3480.
- [23] KURIT N, NEWMAN B D, ARAGUAS L J, *et al.* Evaluation of continuous water vapor  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  measurements by

- OA-ICOS [J]. *Atmos Meas Technol*, 2012, **5**(8): 2069 – 2080.
- [24] RAMBO J, LAI Chunta, FARLIN J, *et al.* On-site calibration for high precision measurements of water vapor isotope ratios using off-axis cavity-enhanced absorption spectroscopy [J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2011, **28**(11): 1448 – 1457.
- [25] JOHNSON L R, SHARP Z D, GALEWSKY J, *et al.* Hydrogen isotope correction for laser instrument measurement bias at low water vapor concentration using conventional isotope analyses: application to measurements from Mauna Loa Observatory, Hawaii [J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2011, **25**(5): 608 – 616.
- [26] SUNMONU N, MURAMOTO K, KURITA N, *et al.* Characteristics of seasonal variation of near-surface water vapor D/H isotope ratio revealed by continuous in situ measurement in Sapporo, Japan [J]. *Sola*, 2012, **8**: 5 – 8.
- [27] ARAGUAS L A, DANESI P, FROELICH K, *et al.* Global monitoring of the isotopic composition of precipitation [J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 1996, **205**(2): 189 – 200.
- [28] JOHNSON K R, INGRAM B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, **220**(3/4): 365 – 377.
- [29] HE Hui, SMITH R B. Stable isotope composition of water vapor in the atmospheric boundary layer above the forests of New England [J]. *J Geophys Res*, 1999, **104**(D9): 11657 – 11673.
- [30] ANGERT A, LEE J E, YAKIR D. Seasonal variations in the isotopic composition of near-surface water vapour in the eastern Mediterranean [J]. *Tellus B*, 2008, **60**(4): 674 – 684.
- [31] LAI Chunta, EHLERINGER J R. Deuterium excess reveals diurnal sources of water vapor in forest air [J]. *Oecologia*, 2011, **165**(1): 213 – 223.
- [32] LEE X H, SMITH R, WILLIAMS J. Water vapor  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  isotope ratio in surface air in New England, USA [J]. *Tellus B*, 2006, **58**(4): 293 – 304.
- [33] WEN Xuefa, ZHANG Shichun, SUN Xiaomin, *et al.* Water vapor and precipitation isotope ratios in Beijing, China [J]. *J Geophys Res Atm*, 2010, **115**: D01103. doi: 10.1029/2009JD012408.
- [34] ZHANG Shichun, SUN Xiaomin, WANG Jianlin, *et al.* Short-term variations of vapor isotope ratios reveal the influence of atmospheric processes [J]. *J Geogr Sci*, 2011, **21**(3): 401 – 416.
- [35] LAI C T, EHLERINGER J R, BOND B J, *et al.* Contributions of evaporation, isotopic non-steady state transpiration and atmospheric mixing on the  $\delta^{18}\text{O}$  of water vapour in Pacific Northwest coniferous forests [J]. *Plant Cell Environ*, 2006, **29**(1): 77 – 94.
- [36] LEE X H, KIM K, SMITH R. Temporal variations of the  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  signal of the whole-canopy transpiration in a temperate forest [J]. *Global Biogeochem Cycl*, 2007, **21**(3): 130 – 144.
- [37] GAT J R. Atmospheric water balance—the isotopic perspective [J]. *Hydrol Process*, 2000, **14**(8): 1357 – 1369.
- [38] WELP L R, LEE X H, GRIFFIS T J, *et al.* A meta-analysis of water vapor d-excess in the midlatitude atmospheric surface layer [J]. *Global Biogeochem Cycl*, 2012, **26**: GB3021. doi: 10.1029/2011GB004246.
- [39] RAMBO J P. *Investigating Forest-atmospheric Water Exchange with High Frequency Spectroscopy Isotope Observations* [D]. San Diego: San Diego State University, 2013.
- [40] GRIFFIS T J, LEE X, BAKER J M, *et al.* Oxygen stable composition of evapotranspiration and its relation to C4 photosynthetic discrimination [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2011, **116**: G01035. doi: 10.1029/2010JG001514.
- [41] WEN Xuefa, LEE X H, SUN Xiaomin, *et al.* Dew water isotopic ratios and their relationships to ecosystem water pools and fluxes in a cropland and a grassland in China [J]. *Oecologia*, 2011, **168**(2): 549 – 561.
- [42] SANTOS E, RIDDLE C W, LEE X, *et al.* Use of the isotope flux ratio approach to investigate the  $\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$  and  $^{13}\text{CO}_2$  exchange near the floor of a temperate deciduous forest [J]. *Biogeosciences*, 2012, **9**(7): 2385 – 2399.
- [43] JACOB H, SONNTAG C. An 8-year record of the seasonal variation of  $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  in atmospheric water vapour and precipitation at Heidelberg, Germany [J]. *Tellus B*, 1991, **43**(3): 291 – 300.
- [44] CRAIG H, GORDON L. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere [C]// TONGIORGI E. *Proceedings of the Conference on Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*. Pisa: Laboratory of Geology and Nuclear Science, 1965: 9 – 130.
- [45] LAW B E, FALGE E, GU L, *et al.* Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation [J]. *Agric For Meteorol*, 2002, **113**(1/4): 97 – 120.



- [46] BALDOCCHI D D, HICKS B B, MEYER T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods [J]. *Ecology*, 1988, **69**(5): 1331 – 1340.
- [47] KOOL D, AGAM N, LAZAROVITCH N, *et al.* A review of approaches for evapotranspiration partitioning [J]. *Agric For Meteorol*, 2014, **184**: 56 – 70.
- [48] KEELING C D. The concentration and isotopic abundance of atmospheric carbon dioxide in rural areas [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1958, **13**(4): 322 – 334.
- [49] KEELING C D. The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural marine air [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1961, **24**(3/4): 277 – 298.
- [50] DONGMANN G, NURNBERG H W, FORSTEL H, *et al.* On the enrichment of H<sub>2</sub><sup>18</sup>O in the leaves of transpiring plants [J]. *Radiat Environ Biophys*, 1974, **11**(1): 41 – 52.
- [51] FARQUHAR G D, CERNUSAK L A. On the isotopic composition of leaf water in the non-steady state [J]. *Funct Plant Biol*, 2005, **32**(4): 293 – 303.
- [52] YEPEZ E A, SCOTT R L, CABLE W L, *et al.* Intraseasonal variation in water and carbon dioxide flux components in a semiarid riparian woodland [J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(7): 1100 – 1115.
- [53] WANG Linxin, GOOD S P, CAYLOR K K, *et al.* Direct quantification of leaf transpiration isotopic composition [J]. *Agric For Meteorol*, 2012, **154**: 127 – 135.
- [54] WANG Xuefeng, YAKIR D. Using stable isotopes of water in evapotranspiration studies [J]. *Hydrol Process*, 2000, **14**(8): 1407 – 1421.
- [55] 袁国富, 张娜, 孙晓敏, 等. 利用原位连续测定水汽 δ<sup>18</sup>O 值和 Keeling Plot 方法区分麦田蒸散组分[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(2): 170 – 178.
- YUAN Guofu, ZHANG Na, SUN Xiaomin, *et al.* Partitioning wheat field evapotranspiration using Keeling Plot method and continuous atmospheric vapor δ<sup>18</sup>O data [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34**(2): 170 – 178.
- [56] MOREIRA M, STERNBERG L, MARTINELLI L, *et al.* Contribution of transpiration to forest ambient vapour based on isotopic measurements [J]. *Global Change Biol*, 1997, **3**(5): 439 – 450.
- [57] YEPEZ E A, WILLIAMS D G, SCOTT R L, *et al.* Partitioning overstory and understory evapotranspiration in a semi-arid savanna woodland from the isotopic composition of water vapor [J]. *Agric For Meteorol*, 2003, **119**(1/2): 53 – 68.
- [58] WANG Lixin, CAYLOR K K, VILLEGAS J C, *et al.* Partitioning evapotranspiration across gradients of woody plant cover: Assessment of a stable isotope technique [J]. *Geophys Res Lett*, 2010, **37**: L09401. doi: 10.1029/2010GL043228.
- [59] AUSTIN A T, YAHDJIAN L, STARK J M, *et al.* Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems [J]. *Oecologia*, 2004, **141**(2): 221 – 235.
- [60] BRESHEARS D D. The grassland-forest continuum: trends in ecosystem properties for woody plant mosaics [J]. *Front Ecol Environ*, 2006, **4**(2): 96 – 104.
- [61] 石俊杰, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 稳定同位素法和涡度-微型蒸渗仪区分玉米田蒸散组分的比较[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(20): 114 – 120.
- SHI Junjie, GONG Daozhi, MEI Xurong, *et al.* Comparison of partitioning evapotranspiration composition in maize field using stable isotope and eddy covariance-microlysimeter methods[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2012, **28**(20): 114 – 120.
- [62] HARWOOD K G, GILLON J S, GRIFFITHS H, *et al.* Diurnal variation of Δ<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>, ΔC<sup>18</sup>O<sup>16</sup>O and evaporative site enrichment of δ H<sub>2</sub><sup>18</sup>O in *Piper aduncum* under field conditions in Trinidad [J]. *Plant Cell Environ*, 1998, **21**(3): 269 – 183.
- [63] FARQUHAR G D, LLOYD J, TAYLOR J A, *et al.* Vegetation effects on the isotope composition of oxygen in atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Nature*, 1993, **363**(6428): 439 – 443.
- [64] XIAO Wei, LEE X H, GRIFFIS T J, *et al.* A modeling investigation of canopy-air oxygen isotopic exchange of water vapor and carbon dioxide in a soybean field [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2010, **115**: G01004. doi: 10.1029/2009JG001163.
- [65] XIAO Wei, LEE X H, WEN X F, *et al.* Modeling biophysical controls on canopy foliage water <sup>18</sup>O enrichment in wheat and corn [J]. *Global Change Biol*, 2012, **18**(5): 1769 – 1780.
- [66] 温学发, 张世春, 孙晓敏, 等. 叶片水 H<sub>2</sub><sup>18</sup>O 富集的研究进展[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(4): 961 – 966.

- WEN Xuefa, ZHANG Shichun, SUN Xiaomin, *et al.* Recent advances in  $H_2^{18}O$  enrichment in leaf water [J]. *J Plant Ecol*, 2008, **32**(2): 961 – 966.
- [67] WHITE J W C. Stable hydrogen isotope ratios in plants: a review of current theory and some potential applications [C]//RUNDEL P W, EHLERINGER J R, NAGY K A. *Stable Isotopes in Ecological Research*, Vol 68. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 142 – 162.
- [68] HELLIKER B R, EHLERINGER J R. Establishing a grassland signature in veins:  $^{18}O$  in the leaf water of C3 and C4 grasses [J]. *P Natl Acad Sci Us*, 2000, **97**(14): 7894 – 7898.
- [69] GAN K S, WONG S C, YONG J W H, *et al.* Evaluation of models of leaf water  $^{18}O$  enrichment using measurements of spatial patterns of vein xylem water, leaf water and dry matter in maize leaves [J]. *Plant Cell Environ*, 2003, **26**(9): 1479 – 1495.
- [70] MAJOUBE M. Fractionnement en oxygen-18 et en deuterium entre l'eau et sa vapeur [J]. *J Chimie et Physique*, 1971, **68**(10): 1423 – 1436.
- [71] MERLIVAT L. Molecular diffusivities of  $H_2^{16}O$ ,  $HD^{16}O$  and  $H_2^{18}O$  in gases [J]. *J Chem Phys*, 1978, **69**(6): 2864 – 2871.
- [72] CAPP A C D, HENDRICKS M B, DEPAOLO D J, *et al.* Isotopic fractionation of water during evaporation [J]. *J Geophys Res*, 2003, **108**(D16): 4525 – 4534.
- [73] FARLIN J, LAI C T, YOSHIMURA K. Influence of synoptic weather events on the isotopic composition of atmospheric moisture in a coastal city of the western United States [J]. *Water Resour Res*, 2013, **49**(6): 3685 – 3696.
- [74] HURLEY J V, GALEWSKY J, WORDEN J, *et al.* A test of the advection-condensation model for subtropical water vapor using stable isotopologue observations from Mauna Loa Observatory, Hawaii [J]. *J Geophys Res Atm*, 2012, **117**(D19): 161 – 169.
- [75] NOONE D, GALEWSKY J, SHARP Z D, *et al.* Properties of air mass mixing and humidity in the subtropics from measurements of the D/H isotope ratio of water vapor at the Mauna Loa Observatory [J]. *J Geophys Res Atm*, 2011, **116**: D22113. doi: 10.1029/2011JD015773.
- [76] STEEN-LARSEN H C, JOHNSON S J, MASSON-DELMOTTE V, *et al.* Continuous monitoring of summer surface water vapor isotopic composition above the Greenland Ice Sheet [J]. *Atmos Chem Phys*, 2013, **13**(9): 4815 – 4828.
- [77] GALEWSKY J, RELLA C, SHARP Z, *et al.* Surface measurements of upper tropospheric water vapor isotopic composition on the Chajnantor Plateau, Chile [J]. *Geophys Res Lett*, 2011, **38**(17): 752 – 767.
- [78] BERKELHAMMER M, HU J, BAILEY A, *et al.* The nocturnal water cycle in an open-canopy forest [J]. *J Geophys Res*, 2013, **118**(17): 10225 – 10242.
- [79] GRIFFIS T J, LEE X, BAKER J M, *et al.* Oxygen isotope composition of evapotranspiration and its relation to C4 photosynthetic discrimination [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2011, **116**: G01035. doi: 10.1029/2010JG001514.
- [80] WEN Xuefa, LEE X H, SUN Xiaomin, *et al.* Dew water isotopic ratios and their relationships to ecosystem water pools and fluxes in a cropland and a grassland in China [J]. *Oecologia*, 2012b, **168**(2): 549 – 561.
- [81] ZHANG Yucui, SHEN Yanjun, SUN Hongyong, *et al.* Evapotranspiration and its partitioning in an irrigated winter wheat field: A combined isotopic and micrometeorologic approach [J]. *J Hydrol*, 2011, **408**(3/4): 203 – 211.