

## 不同植被盖度蒸散分解：稳定同位素技术的评估

Lixin Wang,<sup>1</sup> Kelly K. Caylor,<sup>1</sup> Juan Camilo Villegas,<sup>2,3,4</sup> Greg A. Barron-Gafford,<sup>4,5</sup> David D. Breshears,<sup>2,4,5</sup>  
and Travis E. Huxman<sup>4,5</sup>

1 普林斯顿大学环境工程系, 普林斯顿, 新泽西, 美国

2 亚利桑那大学自然资源与环境系, 图森, 亚利桑那, 美国

3 Grupo GIGA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

4 生物圈 2 号, 亚利桑那大学, 图森, 亚利桑那, 美国

5 亚利桑那大学生态与进化生物学系, 图森, 亚利桑那, 美国

**摘要:** 在水分限制的生态系统中, 分割生态系统尺度蒸散通量 (植物蒸腾与土壤蒸发) 存在理论和技术上的挑战。我们使用了生物圈 2 号的玻璃屋以评估不同植被盖度梯度的蒸腾分割 - 水汽稳定同位素 ( $\Delta D$ ) 的表面波动。我们采用了激光稳定同位素分析仪与 Keeling 图方法进行了通量分割。这种技术的应用与蒸渗仪和茎流计的技术结合进行验证。结果表明, 当植被盖度增长的时候, 蒸腾对蒸散的贡献也逐渐上升, 即盖度在 25% 的时候, T/ET 为 0.61, 而当盖度为 100% 的时候, T/ET 为 0.83。这个技术的进一步开发可以使得野外蒸散的分割成为可能, 这种应用是研究生态水文对土地利用和气候变化的响应的中心议题。

在水分受限制的生态系统中, 蒸散(ET)损失可以占到总的水分输入的 95%以上[Wilcox and Thurow, 2006]。分割干旱区 ET 中蒸腾与蒸散所占的比例至少有三个研究意义: 1) 干旱区生态系统动态取决于植物水分利用与利用效率, 而这只能通过景观尺度的测量进行蒸散分离才能实现; 2) 干旱区水分亏缺使得控制非生产性用水 (蒸发) 和生产性用水 (蒸腾) 的损失; 3) 决定蒸发和蒸腾的相对数量对于解决干旱区生物地化循环水分耦合非常重要[Austin et al., 2004; Breshears, 2006]。然而, 景观尺度上 ET 的分割是一项理论和测量上的挑战[Huxman et al., 2005; Caylor et al., 2006; Moran et al., 2009], 主要的问题在于量化方法的不足。植物蒸腾速率的估计方法包括单株树木茎流的测量[Jackson et al., 2000]、整株树木箱室法测量[Wullschlegel et al., 1998]和土壤蒸渗仪[Scanlon et al., 2005]; 每个方法都存在空间转换的问题。近来, 研究人员试图采用土壤表面温度的时间序列来进行时间尺度上的分割[Moran et al., 2009]。尽管这个方法可以用于大的空间尺度, 但仍取决于整个生长季节土壤水分和蒸腾之间的一致性。水汽稳定同位素在协调小面积试验地[Newman et al., 2010]到景观尺度的蒸散研究方面拥有巨大的潜力[Walker and Brunel, 1990]。蒸

发的过程伴随着高度的同位素分馏，导致蒸发的水分同位素组成中重同位素的贫化[Craig and Gordon, 1965]。与此同时，蒸腾叶片中水的迅速周转意味着蒸腾通常与植物源水的同位素组成相似，尤其是在中午的时候[Ehleringer and Dawson, 1992]。一些情况下叶片发生的同位素富集的原因与导致土壤蒸发分馏的动力学效应和扩散效应相同[Flanagan et al., 1991]，这些非稳态叶片尺度效应通常发生在早晨的短时间内[Flanagan et al., 1991]。因此，蒸腾的同位素组成( $\delta T$ )总是比蒸发的同位素( $\delta E$ )组成更重[Craig and Gordon, 1965]，这两个不同同位素组成的数值可以被用与分割 ET，以得到蒸腾与蒸散的不同比例。

传统上来说，研究者可以使用冷阱的方法以收集水汽样品，这种方法通过把空气样品冷凝收集在容器内用于实验室分析。收集和分析水汽样品的困难已经限制了绝大多数研究的发展，如箱室法[Yepez et al., 2005]，或者短期的调查[Williams et al., 2004]。近些年来，激光稳定同位素分析仪提供了  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  的连续测量功能，其精度与传统的质谱方法相当[Lee et al., 2007; Wang et al., 2009]。

本研究中，我们开发并评估了一项用于野外试验地尺度的蒸散分割的新技术。这种方法采用了激光稳定同位素分析仪与 Keeling 图方法以确定蒸散组曾随不同盖度的变化。这个技术首次提供了重要的试验数据，确定了干旱区植被盖度对蒸散组成的影响。我们同时采用了独立的蒸渗仪与茎流测量验证了其可行性(J. C. Villegas et al., manuscript in preparation, 2010)。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验设置

我们的蒸散试验场地设在生物圈 2 号温室 (Oracle, Arizona, 2008 年 9-10 月)。生物圈 2 号的优点是，其设备允许环境的精细控制，如温度、相对湿度与空气流通；大小尺寸、环境控制与气体交换的设备都很完善[Barron - Gafford et al., 2007]。此外，改变木本植被盖度的试验结构在非温室的条件下执行会很困难。最重要的是，这些设备确保了 E 和 T 的水源是相同的，并且试验期间不存在降雨的影响。我们采用了一个  $10 \times 10$  网格排列的容器(每个  $60 \times 60 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$  深度)。每个容器放置了裸露的土壤或在同样的土壤中种植了 2 米高的单株豆科灌木(*Prosopis chilensis*)。土壤为沙壤土，来自本地的沙漠土壤。我们安排了 25%, 50%, 75% 和 100% 的植被盖度(剩余的位置由裸土来替代)。每种设置方法，所有容器用自来水灌溉到饱和，并允许其排干 16 个小时以达到野外实际情况。

### 2.2. $\delta_{ET}$ 、 $\delta_E$ 和 $\delta_T$ 的连续测量

我们采用了 Keeling 的方法测量了  $\delta_{ET}$  (蒸散通量的  $\delta^2\text{H}$  组成) [Keeling, 1958; Lee et al., 2007]，数据来自于水汽浓度和同位素变动最大的时期，相对应而言是植物最活跃的时候(10 am–7 pm)。气体取样高度为 0.5、1.0 和 2.0 m，仪器采用光腔衰荡原理的激光稳定同位素分析仪 ([WVIA, Los Gatos Research Inc., CA](#))，仪器盖了一层防水布以避免直接的太阳辐射，从而提供温度的稳定性。WVIA 在每次测量前后采用

Wang et al. [2009]描述的校准方法进行校准。每次测量 90 秒，2 秒间隔。每次测量期间缓冲 30 秒以消除不同进样点的响应时间。每个高度 15 分钟重复 1 次。

土壤蒸发  $\delta_E$  的估计采用 Craig - Gordon 模型[Craig and Gordon, 1965]:

$$\delta_E = \frac{\alpha \delta_L - \delta_A h - \varepsilon_K - \varepsilon^*}{(1-h) + 10^{-3} \varepsilon_K} \quad (1)$$

这里的  $\delta_E$  是指土壤蒸发水的同位素组成;  $\alpha$  是温度分馏系数(液水转换的  $\alpha < 1$ ), 这个系数的计算依赖于土壤温度的计算[Majoube, 1971];  $\delta_L$  是蒸发前缘液态水的同位素值;  $\delta_A$  是背景大气的水汽的同位素组成;  $\varepsilon^*$  为  $(1-\alpha) \times 1000$ ;  $\varepsilon_K$  是氢的动力学分馏系数(非湍流条件下为 16.4‰, 湍流下是 10.9‰[Cappa et al., 2003]);  $h$  是相对于土壤温度的相对湿度。基于生物圈 2 号的温度是 39°C,  $\alpha$  值为 0.9393, 遵循 Majoube 方程[1971]。我们采用了亚利桑那大学的 Los Gatos 液态水同位素分析仪测量了灌溉水的同位素组成来估计  $\delta_L$ 。  $\varepsilon_K$  采用 16.4‰[Cappa et al., 2003]。  $\delta_A$  采用 WVIA 来测量。H 值来(0.25–0.30)自生物圈 2 号湿度监测数据。

为了直接估计植物蒸腾的  $\delta_T$ , 我们采用了两个直接的方法, 与之前采用的测量叶片抽提水或非稳态条件下叶片水富集计算的间接方法进行估计[e.g., Yopez et al., 2005]。第一个方法是测量特殊设计的叶片测量室内(100%氮气)的蒸腾。用于确定蒸腾同位素特征的叶片密封在测量室内, 内部包含一个混合风扇, 采用纯氮来冲刷测量室。两株不同的枝条, 每个测量 20 分钟  $\delta^2\text{H}$ (0.5 Hz, 1200 个数据); 数据按枝条被平均。第二个方法是采用 LI-6400 标准叶室(6400 - 02B)测量枝条, 外界空气被用干燥剂过滤, 保证枝条环境空气无水汽。我们植物蒸腾的  $\delta_T$  采用 5 分钟取样数据平均, 3 次重复。所有测量室蒸腾同位素组成在下午 1-3 点光线充足的条件下获得。

### 2.3. 蒸散分割计算

假定符合 2 元蒸发模型, 蒸腾占蒸散的比例 ( $F_T$ , [0 - 1]) 可以表达为,

$$F_T = \frac{\delta_{ET} - \delta_E}{\delta_T - \delta_E} = \frac{T}{ET},$$

这里  $\delta_{ET}$ 、 $\delta_E$  和  $\delta_T$  分别是蒸散、蒸散和蒸腾的同位素比例[Williams et al., 2004]。因为我们的实验系统由裸露的土壤和植被组成, 裸土的蒸发可以进一步分割成树冠下裸土的蒸发( $E_V$ ), 与无树的裸土蒸发( $E_b$ )。为了决定裸土对总 ET 的相对贡献, 我们利用了树冠达到 100%盖度时, ET 主要来自蒸腾和  $E_V$ , 所以,

$$\frac{T_{100}}{E_{100}} = \frac{T}{E_V} = \eta_v, \quad (3)$$

这里  $T_{100}$  和  $E_{100}$  指 100%盖度处理下估计的蒸腾与蒸发,  $\eta_v$  是由树占据的容器内蒸腾对蒸发的比例。

因为每个处理中  $E_T = E_b + E_v + T$ ，我们结合公式(2)和(3)以定义无植被区域土壤蒸发对蒸腾的比例，

$$\frac{E_b}{T} = \frac{1}{F_T} - \frac{1}{\eta_v} - 1,$$

最后，我们定义土壤蒸发对蒸腾的比例  $\eta_s$ ，定义为，

$$\eta_s = \frac{1-f}{f} \frac{T}{E_b}, \quad (5)$$

这里， $f$  是每个处理的植物盖度。公式(2)表明，解决蒸发与蒸腾的相对速率需要每个组分的同位素组成 ( $\delta_E$  和  $\delta_T$ )，以及总的通量的同位素组成 ( $\delta_{ET}$ )。

我们采用 Keeling 图方法确定  $\delta_{ET}$ ，这种方法广泛应用于二氧化碳通量，近来也被用于计算生态系统水平上的  $\delta_{ET}$  [Lee et al., 2007]。Keeling 图方法基于质量守恒定律，

$$\delta^2H_a = c_b(\delta^2H_b - \delta^2H_s)(1/c_a) + \delta^2H_s,$$

这里  $\delta^2H_a$ 、 $\delta^2H_b$  和  $\delta^2H_s$  分别是环境（观测）水汽、背景水汽和蒸散的同位素组成， $c_a$  是环境水汽浓度， $c_b$  背景水汽浓度。

### 3. 结果与讨论

水汽浓度与同位素组成的时间动态都显示了与植物活动相关的日变化图 1)。在上午早期水汽浓度增加，在下午达到峰值，然后逐渐降低，这和取样高度和植被盖度无关(图 1a–1d)。这些结果表明，我们的研究系统中蒸散存在明显的日变化，并且这样的格局主要是以太阳辐射作为驱动力[Villegas et al., 2010a]。水汽浓度总是在夜间达到最小值(图 1a–1d)，显示在 8-10 个小时期间其与外部大气进行了完全的混合。水汽  $\delta^2H$  数值也表明了明显的日变化格局。不考虑取样高度与植被盖度，水汽同位素上午开始增加，在中午达到峰值，并开始逐步降低(图 1e–1g)。 $\delta^2H$  的日变化反映了植物与土壤对近地表大气同位素的影响。由于总的 ET 被蒸腾所占据（水的同位素比大气的重），因此当植物开始蒸腾的时候，大气同位素将越来越富集。存在垂直的同位素梯度，尤其是在日间（这个时候  $\delta^2H$  在 2 米该的地方比较高）。提高的  $\delta^2H$  基本上与植被盖度的增长一致，表明蒸腾占蒸散的比例在增加。

定义植物蒸腾  $\delta^2H$  的两个方法结果不同。自己设计的测量室方法数值为  $-62.1\text{‰}$ ，而 LI-COR 的叶室得到的数值为  $-74.1\text{‰}$  (图 2a 和 2b)。由于灌溉水的  $\delta^2H$  为  $-63.3 \pm 0.1\text{‰}$ ，我们仅测量室的结果进行使用分割计算，这是基于植物蒸腾不应该导致分馏的稳态假设。LI-COR 的测量结果偏轻了  $\sim 10\text{‰}$ ，很有可能是由于少量环境水汽的污染，大气的同位素值为大约  $-110\text{‰}$ 。研究文献很少报道直接测量植物蒸腾的同位素组成 [Lai et al., 2005]。考虑到直接测量结果比较少，而我们采用的不同方法得到的结果也不一致，我们期望未

来方法的改进可以准确地测量蒸腾同位素组成将导致当前理论预测模型得到重大的改进，并更好解释蒸腾期间叶片水的富集[Flanagan et al., 1991]。

我们计算的蒸发同位素  $\delta^2\text{H}$  为 $-137\text{‰}$ ，这比此前干旱环境重测量的结果略低( $-131\text{‰}$  [Williams et al., 2004])。显而易见，我们的结果支持了植被盖度增加，而导致由于蒸腾所占比例增加导致的  $\delta_{\text{ET}}$  增加的预期 [Breshears, 2006]。具体涑水，平均  $\delta_{\text{ET}}$  (10 am–7pm)在 25%盖度的时候为 $-90.8\text{‰}$ ，在 50%盖度的时候为 $-84.7\text{‰}$ ，在 75%盖度的时候 $-78.4\text{‰}$ ，在 100%盖度的时候为 $-74.7\text{‰}$ (ANOVA,  $p < 0.001$  (图 2c))。由于  $\delta_{\text{ET}}$ 、 $\delta_{\text{E}}$  和  $\delta_{\text{T}}$  都是独立测量和计算得到的，因此我们可以确定不同植被盖度蒸腾对蒸散的贡献( $F_{\text{T}}$ ) (公式(2))。我们的结果表明  $T/\text{ET}$  随着植物盖度的增加而增加，植被盖度从 25-100%上升的时候， $F_{\text{T}}$  从 61%提高到 83%。这个分割的比例与同步进行蒸渗仪和茎流仪的结果是一致的，在不考虑夜晚蒸发的情况下，其  $F_{\text{T}}$  值分别是 0.36、0.42、0.70 和 0.79(J. C. Villegas et al., 2010)。在这两种方法之间的差别是 4%-26%，平均为 15.6%。考虑到茎流和同位素测量的不确定性，在这两种方法证明了我们的信技术的可信程度。盖度从 25%-75%的时候， $E_{\text{b}}/T$  的比例分别是 0.43、0.22 和 0.08，表明裸土蒸发与蒸腾相比随植被盖度的增加而减少[Villegas et al., 2010b]。然而，裸土蒸发单位面积  $\eta_{\text{s}}$  的相对有效性随盖度增加仅轻微变动(25%盖度时为 0.15，50% 时为 0.22，75%时为 0.23)，这表明，在我们的试验中，低的叶面积指数对裸土的遮阴效果很小。这和野外观测的结果是一致的[Villegas et al., 2010a]。

我们的结果初步揭示了 ET 分割如何随植被盖度的改变而改变，尽管与盖度的关系仍然不确定，并可能随气候、土壤、叶面积和种类等因素的影响[Huxman et al., 2005; Breshears, 2006]。我们的试验设计分离了不同容器的土壤植被，排除了地下根系之间的联系。而这种联系将影响测量结果[Caylor et al., 2006; Newman et al., 2010]，因此我们的分割技术或许与野外的实际情况不完全一致。

我们的试验结果阐明了连续  $\delta_{\text{ET}}$  测量并进行景观尺度上的 ET 分割技术的应用。在我们的实验中，蒸发通量仅来自裸土，而在自然环境中，在植被冠层的降雨截留和之后的蒸发可以对总蒸发产生明显的影响。由于来自土壤和冠层表面的蒸发由同样的原理所决定，因而会产生同样的信号。这个新技术将可以进行许多不同生态系统的 ET 的分割。在土壤水比雨水对同位素组成影响更多的区域，甚至可以进一步区分冠层与土壤蒸发的比例。我们的研究也包括直接测量植物蒸腾方法的开发，过去这种测量主要是靠测量植物源水和模拟水分在非稳态状态下的富集来估计的。

尽管我们的技术提供了新的方法，并取得了重要的进展，我们认为仍然有必要进行高频率的涡相关同位素测量以消除对 keeling 图方法的依赖性(需要近地表水汽同位素梯度)。

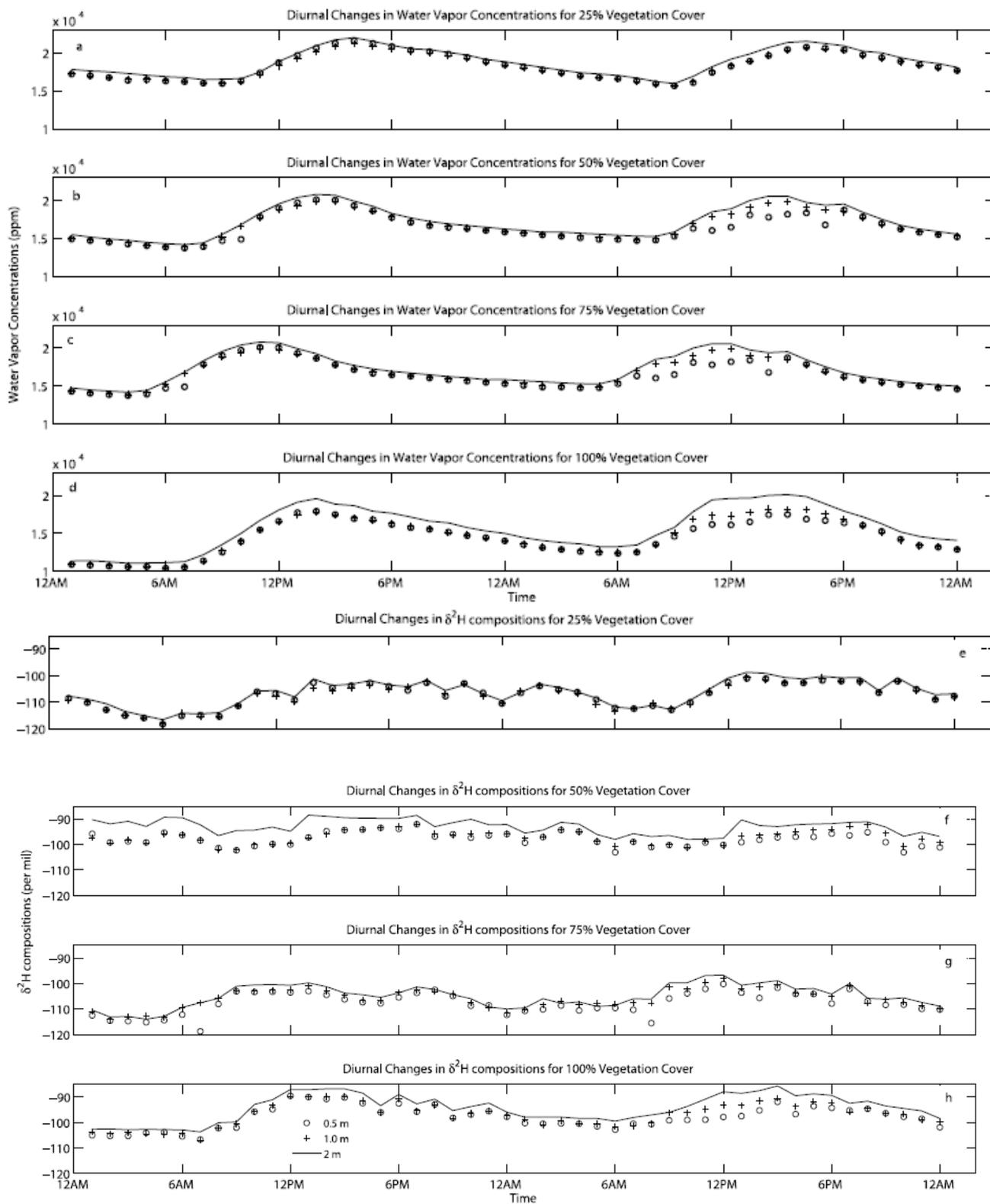


图 1. 不同盖度、不同高度(0.5 m, 1 m and 2 m)水汽浓度日变化和水汽同位素日变化

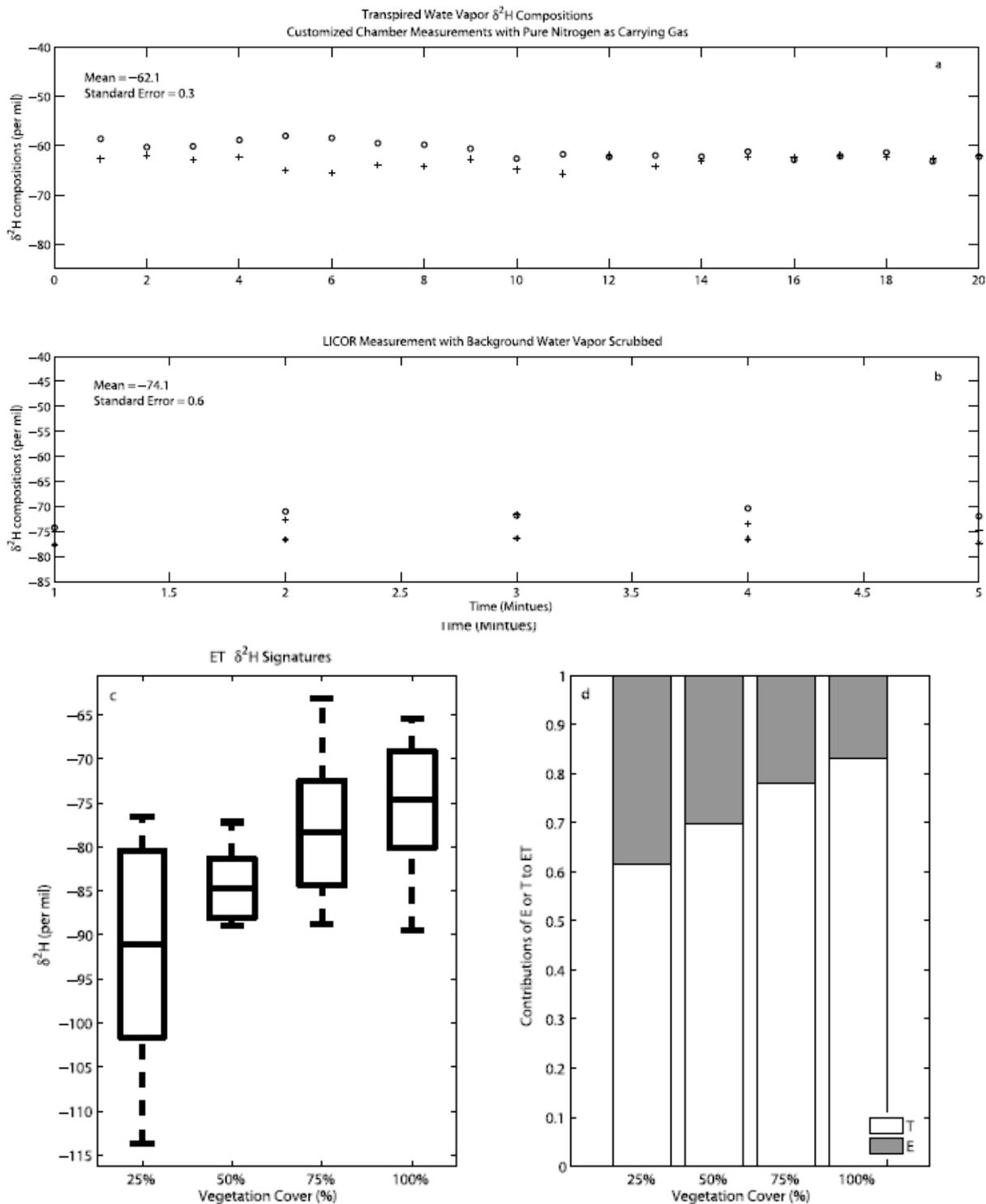


图 2. (a) 采用自制的测量室测量同位素，使用高纯氮作为载气；(b) LICOR 6400 叶室采用干燥剂过滤水分冲刷。(c)计算不同植被盖度的蒸散同位素  $\delta^2\text{H}$ ；(d)不同植被盖度下蒸腾占蒸散的比例



生物圈 2 号现场的样地设置