

氢稳定性同位素确定植物水源的应用与前景

曹燕丽¹, 卢琦¹, 林光辉²

(1. 中国防治荒漠化研究与发展中心 中国林科院林业研究所, 北京 100091; 2. Biosphere 2 Center and Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, 32540 S. Biosphere Road, Oracle, Arizona 85623, USA)

摘要:介绍了氢稳定性同位素的测定方法和 δD 分析在植物水分来源研究中的应用的原理、方法和典型案例。植物对不同水源的选择性和植物水分的 δD 分析被用于各种群落类型和环境分析植物短期和长期的水分利用形式, 甚至定量确定不同环境中各种植物对不同水分来源的利用, 如白松、荒漠植物、河岸林和海岸植物。 δD 分析还用于研究植物与植物之间的相互作用。此外, 氢稳定性同位素分析在古气候研究、植物光合途径、动物生理生态学和食物链等生态学领域也有着广阔的应用前景。

关键词: 氢; 重氢; 稳定性同位素; 植物水分来源

Review and Perspective on Hydrogen Stable Isotopes Technique in Tracing Plant Water Sources Researches

CAO Yan-Li¹, LU Qi¹, LIN Guang-Hui² (1. National Research and Development Center for Combating Desertification, and Institute of Forestry Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Biosphere Center and Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, 32540 S. Biosphere Road, Oracle, Arizona 85623, USA). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 111~117

Abstract: This paper described the principle and methods of hydrogen stable isotope analyses, and the typical case studies of δD analyses applied to plant water sources researches. The hydrogen isotope composition of source water and plant water can be used to analyze patterns of plant-water use from both a short-term and a long-term perspective and across a broad spectrum of community types and environments, even to partition quantitatively the contribution of different water sources to the plant water uptake in plants such as white pines, desert plants, riparian trees, and coastal plants. The analysis of δD can also be used in studies of plant-plant interactions. In addition, there is also great perspective in application of hydrogen stable isotopes analysis to other ecological research such as paleoclimate, pathways of photosynthesis, physiological ecology of animal and food chain.

Key words: hydrogen; deuterium; stable isotopes; plant water sources

文章编号: 1000-0933(2002)01-0111-07 中图分类号: Q948 文献标识码: A

20 世纪 30 年代早期, Urey 等发现了元素氢的一个稳定性同位素——重氢(^2H 或 D)^[1], 此后对水密度的仔细测量发现不同来源的水中重氢含量不同。同位素质谱仪的发展^[2~4], 使精确测量氢同位素的相对丰度成为可能。

自然界中重同位素与轻同位素相比, 含量极低。因此, 以绝对量表达同位素的差异, 十分不便。Mckinney 等^[5]用相对量表达同位素累积的程度, 并给出下式定义:

$$\delta X^{\circ} = [(R_{sam} - R_{std}) / R_{std}] \times 1000$$

基金项目: 国家自然科学基金重大基金(39990490)资助项目

收稿日期: 2000-12-30; 修订日期: 2001-08-28

作者简介: 曹燕丽, 女, 河北邯郸人, 硕士, 助理研究员。主要从事生态学和荒漠化防治研究。

其中 X^* 为元素的重同位素, R_{sam} 为样品的重(X^*)与轻(X)同位素之比, R_{std} 为标准物质的 X^*/X , 这种相对同位素含量的表达方式现已被广泛接受和使用。对于氢元素的标准 D/H , 公认的 SMOW (标准平均海洋水) 是 $155.76(\pm 0.10) \times 10^{-6}$, SLAP (标准轻南极降水) 是 $89.01(\pm 0.05) \times 10^{-6}$ ^[6~8]。因此, 各种样品的 δD 用下式表达:

$$\delta D = [(D/H)_{sam} / (D/H)_{std} - 1] \times 1000 \tag{1}$$

利用氢稳定性同位素方法研究植物水分来源是一种较为先进的手段, 可以定量分析不同生境下水的来源、走向、植物对不同来源的选择性吸收及水分利用形式, 本文从其应用原理、测定方法及研究实例等方面做了介绍。该方法对于生态系统中浅层地下水变化的生态环境效应以及植被建设的分区、布局、林草种选择等研究都有一定参考价值。

1 氢稳定性同位素测定方法

1.1 样品制备

对于动植物组织, 为避免有机物损失, 需尽快冷冻并冻干, 或在中等温度下快速干燥, 然后研磨至通过 40 目筛。一般情况下, 测量 D/H 只需不到 3 mg 干有机物。在分析 D/H 比率之前, 有机物的样品需经过硝化处理, 去除可能与环境交换的氢原子。制备水样需在采集时将水立即密封, 避免分析前因蒸发导致同位素分差^[9]。

1.2 样品的气化、纯化和分离

将测量材料装入材料管, 加入催化剂(1 g 氧化铜、1 g 铜和一小片银)。将材料管与真空系统连接, 抽到真空后封管, 然后放入炉内燃烧。燃烧后的材料管内混杂有各种气体, 须在特制的系统中分离, 使所需的气体纯化, 然后收集入测试管。

1.3 质谱仪测定分析

在同位素比率质谱仪中, 纯的气体 H_2 从飞行管一端导入。在此处, 离子源撞击气体外层的一个电子, 使气体离子化。离子化的气体束被加速, 并在强大的磁场作用下沿飞行管发生偏转。因为含有不同同位素的气体离子电荷相同而重量不同, 有不同的质量-电荷比, 因而发生不同的偏转, 可以被磁场区分出来。飞行管另一端是一系列收集器(法拉第杯), 这些位置固定的收集器可捕捉不同质量的带电荷离子。与法拉第杯连在一起的 DC 放大器将离子的冲撞转变为电压信号, 然后再转变为频率信号^[9]。

冲撞法拉第杯的信号绝对量并不重要, 因为它取决于导入质谱仪的气体总量等因素。重要的是不同的法拉第杯测到的信号之比。氢同位素的测定需两个法拉第杯, 因其离子化的气体只有两种: $^1H^1H$, $^2H^1H$ 。样品和标准气体通过对称排列的插入物导入质谱仪。使用转换值在标准气体和样品气体间转换, 二者之间的信号的不同用以计算样品的同位素比率。通常, 质谱仪在计算机辅助下能直接给出同位素比值^[9]。

2 氢稳定性同位素分析确定植物水分来源的原理和方法举例

2.1 原理

植物中氢的主要来源是水, 植物所能利用的水分主要来自降水、土壤水、径流(包括融雪)和地下水。土壤水、径流和地下水最初也全部来自降水, 但由于以下因素, 它们具有不同的 δD , 这些因素是: (1) 物理过程, 如蒸发; (2) 集水盆地的大小和海拔; (3) 地下蓄水层的深度和地质特征; (4) 土壤亚表层水分的溶解特征和水分运动速度^[10~14]等。例如, 当水由液体变为气体, 其中的 D 减少, 反之, 当水从蒸气中凝聚出来时, D 增加; 当云团经过较干燥的大陆上空向内陆移动时, 水蒸气中的 D 减少(每 100 km 减少 3‰~45‰以上)。另外, 沿热量梯度, 从低海拔到高海拔, 大气水中 D 的递减率为 1‰~5‰/100m, 从赤道地区到极地递减量为 3‰~150‰^[14~16]。

除了排盐(salt-excluding)种类^[17], 水分在被植物根系吸收和从根向叶移动时不发生氢同位素分差^[18~21], 因此, 对比植物水分与各种水源的同位素组成可以确定植物对不同水源的选择性。

2.2 方法举例

确定植物水分来源, 首先用同位素质谱仪测定环境中可能的水分来源(如降水、土壤水、径流、地下水等)和植物水分(根系水、茎水或木质液)的氢同位素组成。然后, 通过对比和模型计算可得到植物利

用的不同来源水分所占的比例。

当植物利用的是某一种水分来源时,通过将植物水分的 δD 与各种水源的 δD 进行对比,即可得知植物利用的水分来源^[22~26]。

如果通过 δD 数据的对比确定植物利用的是某两种水源时,可以用简单的两端线性混合模型确定每一种来源所占比例^[21]。当两种水源(如海水和淡水)的 δD 不同时,植物水分的 δD 一定介于两者之间。将具有较大 δD 值的水源(如海水)作为富集端,具有较小 δD 值的水源(如淡水)作为消耗端,则植物水分中消耗端水源所占的比例为:

$$P_{\text{消耗}} = (\delta D_{\text{富集}} - \delta D_{\text{植物}}) / (\delta D_{\text{富集}} - \delta D_{\text{消耗}}) \quad (2)$$

其中, $P_{\text{消耗}}$ 表示植物水分中消耗端水源所占的比例, $\delta D_{\text{富集}}$ 、 $\delta D_{\text{消耗}}$ 和 $\delta D_{\text{植物}}$ 分别表示富集端水源、消耗端水源和植物水分的 δD ^[27]。

以上是由同位素 D 的浓度计算,对于 δ 值差别很小的情况,将 D 和 ^{18}O 同时作为示踪原子精确度会更高。例如, Thorburn 和 Walker 在 1993 年的研究中,从树液与各种水源的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据的比较,知道植物利用的是土壤水和地下水^[28]。首先,将土壤水、地下水和植物水分的多个样本的数据绘制在 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 图上,这些样本数据大致落在一条直线上,这些数据的回归关系是:

$$\delta D = A\delta^{18}\text{O} + B, \quad (3)$$

树液样本中地下水的比例由 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 图上树液和土壤水之间的距离与地下水和土壤水之间的距离比给出。 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 图上树液和土壤水数据的距离(D_{s-t})计算公式如下:

$$D_{s-t} = \sqrt{(X_s - X_t)^2 + (Y_s - Y_t)^2}, \quad (4)$$

其中, X 是样本的 $\delta^{18}\text{O}$, Y 是样本的 δD , 下标 s 和 t 表示土壤水和树液。类似地,地下水和土壤水数据的距离(D_{s-g})计算公式:

$$D_{s-g} = \sqrt{(X_s - X_g)^2 + (Y_s - Y_g)^2}, \quad (5)$$

其中,下标 g 表示地下水。因此,得到树液中地下水的比例为:

$$P_g = D_{s-t} / D_{s-g} \quad (6)$$

计算所用样本的 δD 都是用方程(3)从测量的 $\delta^{18}\text{O}$ 计算出的 δD ,即方程(4)和(5)的 Y 值是计算出的 δD ^[28,29]。

如果,植物利用的两种水源中,有一种处于动态变化中,模型会稍复杂些。例如,已知一个植物的水分来源为地下水和一次夏季暴雨的混合物,模型可以写作:

$$\delta D_{sap} = [X \cdot \delta D_{GW} + (1 - X) \cdot \delta D_R] \cdot (1 - t/d) + t/d \cdot \delta D_{GW} \quad (7)$$

其中, δD_{GW} 为地下水的 δD , δD_R 为雨水的 δD , X 为雨后地下水的比例, d 为雨水在植物水分中的衰减期,单位为 d , t 为从下雨后开始的时间,单位为天。 $t=0$ 时,植物汁液的 δD (即 δD_{sap})等于刚下完雨时地下水和雨水混合物的 δD ; $t=d$ 时, δD_{sap} 等于地下水的 δD 。如果植物没有利用地下水, δD_{GW} 也可以是径流或土壤水的 δD 。这样,从下雨开始到植物水分重新等于地下水、径流或土壤水的 δD 为止,每天测定植物水分的 δD ,即可确定 X 。

对于两次或更多次降水的情形,以上方程可以扩展为:

$$\delta D_{sap} = [X_2 \cdot \delta D_{GW} + (1 - X_2) \cdot \delta D_R(\text{rain2})] \cdot (1 - t_2/d) + \delta D_{sap}(\text{rain1}) \cdot t_2/d \quad (8)$$

$\delta D_{sap}(\text{rain1})$ 是从第一次降雨得到的植物汁液的 δD , X_2 是第二次降水后的 X 值, t_2 是从第二次下雨后开始的时间,单位为 d 。另外的降水事件可以用同样的方法结合进来^[21]。

3 研究实例

3.1 森林群落

White 等分析了阿肯色州沼泽地优势树种 *Taxodium distichum* 的边材木质液的 δD ,发现它不受夏季降水影响,因为数据在浅水层下,降水影响不到它利用的地下水的 δD 。纽约州干燥处的白松 *Pinus strobus* 在暴雨后 5 d 里几乎完全利用雨水,第 6 天开始吸收心材水分——多次降水的时间平均值;湿润处

的白松暴雨后的木质部 δD 介于雨水和地下水之间,表明两者都利用,5 d 或 6 d 后, δD 几乎与地下水相同。通过计算,干燥处的白松,在干旱和湿润的夏季分别利用了雨水的 20% 和 32%,湿润处的树木这个数字为 10% 和 16%^[16,21]。

3.2 河岸群落

河岸植物有 3 种可利用的水源:雨水补给的土壤水、河水和地下水。在美国西部盐湖城附近,雨水的 δD 为 -200‰ (冬季)~ -20‰ (夏季),河水基本稳定在 -121‰ 。远离河流的小树利用土壤水,靠近河流的小树利用河水。而大树,无论是否长于河岸, δD 都与地下水相同,而不是与河水相同,说明大树吸收水分最活跃处在土壤深层。这一地区峡谷河流经常改道,地下水是最稳定的水源。如果树木要在干旱环境中活下来,需要具备利用地下水的潜能,因此出现河岸树木不利用河水的现象^[22]。类似地,澳大利亚的冲积平原上,研究发现被河水泛滥的树木主要水源不是河水,树木汁液同位素组成与附近未被泛滥的树木相似。随着表层土壤干燥程度的上升,树木利用地下水的比例从 40% 上升到 63%^[28]。另外,Smith 等人研究了 Eastern Sierra 河岸群落,发现优势树种在生长季逐渐由利用土壤水转到利用地下水^[30]。

3.3 海岸群落

Sternberg 等人研究表明淡水比海水有较少的 D,佛罗里达南部,热带和亚热带硬木种类(如 *Coccoloba*, *Bursera*, *Eugenia*, *Ficus*, *Psychotria*)主要利用淡水(降水径流),耐盐种类(如 *Salicornia*, *Cenchrus*, *Conocarpus*)几乎全部利用海水,红树林对两种水分来源的利用具有广谱性^[23,24]。

3.4 荒漠群落

在犹他州与亚里桑那州交界处一个沙漠灌丛群落中,通过测定优势植物木质部水分 δD 研究了荒漠植物对夏季降水的利用。1 年生植物和肉质植物 *Yucca angustissima* 只利用夏季降水;多年生种类利用夏季降水和深层土壤水——保存的冬季降水,其中草本种类水分的 91% 和木本种类的 57% 来自夏季降水;两种深根系多年生种类的 δD 与泉水相近,表明它们利用地下水和残留的冬季土壤水分^[31]。全球变化模型(GCMs)预测,大气二氧化碳倍增后,此地冬季降水保持不变,夏季降水将增加^[32]。因此,利用较多夏季降水的种类将具有竞争优势^[31]。

Lin 等在 7 月份和 9 月份用富含同位素 D 的水模拟降水增加 25 mm 和 50 mm 的情形,分析茎干汁液的 δD 来研究干旱荒漠中的多年生灌木对夏季雨水的利用。在 5 个种类中,*Chrysothamnus nauseosus* 没有利用增加的降水,利用了冬春降雨补充的深层土壤水。其余种类 *Atriplex canescens*, *Artemisia filifolia*, *Coleogyne ramosissima* 和 *Vanceleva stylosa* 对增加的雨水吸收明显,增加的 25 mm 降雨占茎干水分比例在 7 月份和 9 月份分别是 1% 与 13%、5% 与 20%、20% 与 55%、12% 与 27%,增加的 50 mm 降雨为 2% 与 13%、25% 与 35%、42% 与 58%、16% 与 52%。增加的降水在 9 月份比在 7 月份被吸收的多,可能是仲夏土壤温度高,抑制了根系水分吸收^[33]。附近林地群落的调查也表明 *Juniperus osteosperma* 在温暖夏季比凉爽夏季有较少的夏季水分吸收^[34]。

另外,在荒漠 Pinyon-Juniper 林群落,侧根多的种类较多吸收夏季降水;深根系种类几乎完全依赖地下水^[35]。季风降雨稀少的地方,树木依赖深层土壤水^[25]。犹他州的干旱灌丛中,幼年植物更多依赖夏季水分^[36],附近的 oak-maple 林地,橡树和枫树都不利用表层土壤水,而利用冬季降水存留的深层土壤水^[26]。研究发现,较多依赖夏季降水的植物有明显低的叶片水分潜能,经受较重的水分胁迫,有较高的水分利用效率;而利用地下水的植物经受较少的水分胁迫,有较低的水分利用效率^[31]。

3.5 植物间的相互作用

深根系种类(如高大的乔木)将吸收的深层土壤水释放到上层土壤,这个过程称为“水力提升”(hydraulic lift)。提升上来的水分帮助它度过旱季,同时相邻的植物(如树下的草本)也可以“坐享其成”^[37,38]。如在纽约州的夏季干旱中,地下水被糖槭 *Acer saccharum* 水力提升上来,附近浅根系的草本、灌木和幼树随着到大树距离的增大表现出越来越重的萎蔫程度。 δD 分析显示它们利用的水分中“水力提升水分”所占的比例:野草莓 *Fragaria virginiana* 为 46%~61%,矮灌木越橘 *Vaccinium vacillans*、多年生草本秋麒麟草 *Solidago flexicaulis* 和禾草 *Holcus lanatus* 为 19%~25%,小山毛榉树 *Fagus grandifolia* 为 7%。与其它

种类比,利用水力提升水的草本种类一般具有较高的叶片水势、叶片传导率和有利的水分平衡,对于竞争水分优势明显^[27]。

3.6 植物水分利用的历史再现

通过测定年轮纤维素的 δD ,可以重建植物对水分利用的变化历史。Dawaon 等分析 叶槭 *Acer negundo* 的年轮宽度(代表径向生长增量)和年轮中的 δD ,表明在生命最初 20~25a 中, δD 值与夏季降水相似,径向增长不规律。25 a 以后 δD 与地下水相似,年轮较大,生长稳定。说明 叶槭年幼时利用地表水源(如降水或河水),生长不稳定与水源的不稳定有关;树木长到一定大小,利用到了稳定的水源——地下水,因而稳定地生长^[22]。类似地研究还见于 White 对 *Pinus Strobus* 的报道,都说明树轮中 δD 能够指示树木生长过程中利用的水源^[39]。

4 氢稳定性同位素分析在其它研究中的应用

4.1 古气候研究

20 世纪 70 年代初开始的对有机物中重氢的调查以及之后的研究表明植物纤维素的氢、氧稳定性同位素组成与主要气候因子如温度、湿度及降雨量之间有密切的相关关系^[40~46]。因此,根据树木年轮中纤维素的 δD 可推测古气候的变化。Libby 等发现从 1700 年到 1975 年,一株德国橡树纤维素的 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化与冬季温度的变化相吻合^[43]。

4.2 植物光合途径

有不同光合途径的植物 δD 不同,CAM 植物的 δD 明显大于 C_3 和 C_4 植物,温室条件下, C_4 植物的 δD 又比 C_3 植物高^[47]。通过分析植物硝化纤维素的 δD ,可区分出植物这 3 种主要光合途径。

4.3 动物生理生态学

可用双标水法(Doubly Labeled Water Method)研究动物的水分、食物及能量需求。双标水 $DH^{18}O$ 注入机体后,标记的氧元素 ^{18}O 将以 H_2O 和 CO_2 方式失去,标记的氢元素 D 以 H_2O 的方式消失^[48]。两种标记元素转化速率的差异与 CO_2 排放量成正比。监测 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化可以得到动物的水分损失及 CO_2 排放量。此方法可以在动物自由活动测定,测定 CO_2 排放量的标准误差不超过 5%,标准差只有 3%~10%。利用这一技术,Nagy 等研究了爬行动物及鸟类的能量代谢^[49,50],Schoeller 等研究了人体的能量消耗^[48]。

4.4 食物链研究

动物机体组织中的 δD 与所吃食物的 δD 相近。分析生态系统内各营养级生物的 δD 能揭示该系统的营养关系及元素在系统内的流动过程。在早期的研究中,通常只分析一种稳定性同位素,主要是碳同位素^[51~53],对于复杂的食物网,就需要两种或两种以上稳定性同位素综合技术,因为一种元素的同位素比率相同的有机体,另一种元素的同位素比率可能完全不同。

5 结语

尽管 D 相对稀少, δD 却在物理学、大气科学、地质学、地球化学、生物科学研究中引起了革命。生物,尤其是植物的机体组织中的 D 反映了它们生活的环境中的水分来源的同位素组成。环境水中的 δD 值变化很大,与新陈代谢过程有关的分差进一步影响机体组织的 δD ^[47,54~57]。来源水、植物水分和树轮纤维素的氢同位素组成分析可用于在各种群落类型和环境分析植物短期和长期的水分利用形式,还可用于研究植物与植物之间的相互作用。分析植物水分和环境水分的 δD 对研究环境变化如何影响植物水分利用和水分关系有很大潜力,也有助于对与区域或局地景观水文学联系紧密的植物群落的评价和管理。 δD 和其它稳定同位素分析的应用最终可能允许不同尺度的信息相互联系并综合起来,在叶片水平或整株植物获得的信息能够用来作出生态系统水平的有意义的预测。

参考文献

[1] Urey U C, Brickwedde I G and Murphy G M. A hydrogen isotope of mass 2 and its concentration. *Phys. Res.*, 1932, **39**: 1~15.
[2] Nier A O. A mass spectrographic study of the isotopes of argon, potassium, rubidium, zinc, and cadmium. *Phys. Rev.*, 1936, **50**: 1041~1045.

- [3] Nier A O. A mass spectrometer for routine isotope abundance measurements. *Rev. Sci. Instrum.*, 1940, **11**: 212~216.
- [4] Nier A O. Some reminiscences of isotopes, geochronology, and mass spectrometry. In: Lederberg J. ed. *Excitement and Fascination of Science: Reflections by Eminent Scientists*. Palo Alto, CA: Annual Reviews, Inc. 1990. Vol. 3, parts 1 and 2, 590~607.
- [5] McKinney C R, McCrea J M, Epstein S, *et al.* Improvements in mass spectrometers for the measurement of small differences in isotope abundance ratios. *Rev. Sci. Instrum.*, 1950, **21**: 724~730.
- [6] Hayes J M. Practice and Principles of isotopic measurements in organic geochemistry. In: Meinschein W G. ed. *Organic Geochemistry of Contemporaneous and Ancient Sediments*. Bloomington, Indiana: SEPM. 1983. 5~31.
- [7] Gonfiantini R. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, 1978, **271**: 534~536.
- [8] Ehleringer J R and Rundel P W. Stable isotopes; History, Units, and Instrumentation. In: Rundel P W, Ehleringer J R and Nagy K A. eds. *Ecological studies*. Vol. 68. Stable Isotopes in Ecological Research. Heidelberg: Springer-Verlag, 1988. 1~15.
- [9] Ehleringer J R and Osmond B O. Stable Isotopes. In: Pearcy R W, Ehleringer J, Mooney H A, *et al.* eds. *Plant Physiological Ecology. Pearcy: field methods and instrumentation*. London, New York: Chapman and Hall. 1989. 281~300.
- [10] Fontes J-Ch. Environmental isotopes in groundwater hydrology. In: Fritz P and Fontes J-Ch. eds. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier. 1980. 411~440.
- [11] Allison G B and Hughes M W. The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region. *J. Hydrol.*, 1983, **60**: 157~173.
- [12] Barnes C J and Allison G B. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils. *J. Hydrol.* 1983, **60**: 141~156.
- [13] Nordstrom D K, Ball J W, Donahoe R J, *et al.* Groundwater chemistry and water-rock interactions of Stripa. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, **53**: 1727~1740.
- [14] Ingraham N L and Taylor B E. Light stable isotope systematics of large-scale hydrologic regimes in California and Nevada. *Water Resources Res.*, 1991, **27**: 77~90.
- [15] Friedman I, Redfield A C, Schoen A, *et al.* The variation of deuterium content of natural waters in the hydrologic cycle. *Rev. Geophys.*, 1964, **2**: 177~224.
- [16] White J W C. Stable hydrogen isotope ratios in plants: A review of current theory and some potential applications. In: Rundel P W, Ehleringer J R and Nagy K A. eds. *Ecological Studies*. Vol. 68. Stable Isotopes in Ecological Research. Heidelberg: Springer-Verlag., 1988. 142~162.
- [17] Lin G and Sternberg L. Hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants. In: Ehleringer J, Hall A and Farquhar G. eds. *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*. Academic Press, Inc., 1993. 497~510.
- [18] Gonfiantini R, Gratzu S and Tongiorgi E. Oxygen isotopic composition of water in leaves. In: *Isotopes and Radiation in Soil-Plant Nutrition Studies*. Vienna: Intern. At. Energy Agency. 1965. 405~410.
- [19] Wershaw R L, Friedman I and Heller S J. Hydrogen isotope fractionation of water passing through trees. In: Hobson F and Speers M. eds. *Advances in Organic Geochemistry*. New York: Pergamon, 1966. 55~67.
- [20] Zimmermann V, Ehleringer J R and Munnich K O. Soil-water movement and evapotranspiration: Changes in the isotopic composition of water. In: *Proceedings of the Symposium of Isotopes in Hydrology*. Intern. At. Energy Assoc. Pub., 1966. 567~585.
- [21] White J W C, Cook E R, Lawrence J R, *et al.* The D/H ratios of sap in trees: Implications of water sources and tree ring D/H ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, **49**: 237~246.
- [22] Dawson T E and Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 1991, **350**: 335~337.
- [23] Sternberg L d S L and Swart P K. Utilization of freshwater and ocean water by coastal plants of southern Florida. *Ecology*, 1987, **68**: 1898~1905.
- [24] Sternberg L d S L, Ish-Shalom-Gordon N, Ross M, *et al.* Water relations of coastal plant communities near the ocean/freshwater boundary. *Oecologia*, 1991, **88**: 305~310.
- [25] Gregg J. The differential occurrence of the mistletoe, *Phoradendron juniperinum*, on its host, *Juniperus osteosperma*, in the Western United States. MS Thesis, University of Utah, Salt Lake City, 1991.
- [26] Phillips S L and Ehleringer J R. Limited uptake of summer precipitation by bigtooth maple (*Acer grandidentatum* Nutt) and Gambel's oak (*Quercus gambelii* Nutt). *Trees*, 1995, **9**: 214~219.
- [27] Dawson T E. Hydraulic lift and water use by plants; implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 1993, **95**: 565~574.
- [28] Thorburn P J and Walker G R. The source of water transpired by *Eucalyptus camaldulensis*: soil, groundwater, or streams? In: Ehleringer J, Hall A and Farquhar G eds. *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*. Academic Press, Inc., 1993. 511~527.
- [29] Thorburn P J, Walker G R and Hatton T J. Are River Red Gums taking water from soil, groundwater, or streams? In: *Catchments of Green—The Proceedings of the National Conference on Vegetation and Water Man-*

- agement. Australia: Adelaide, 1992. 37~42.
- [30] Smith S D, Wellington A B, Nachlinger J L, *et al.* Functional responses of riparian vegetation to streamflow diversion in the eastern Sierra Nevada. *Ecol. Appl.*, 1991, **1**: 89~97.
- [31] Ehleringer J R, Phillips S L, Schuster W S F, *et al.* Differential utilization of summer rains by desert plants. *Oecologia*, 1991, **88**: 430~434.
- [32] Schlesinger M E and Mitchell J F B. Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide. *Rev. Geophys.*, 1987, **25**: 760~798.
- [33] Lin G, Phillips S L and Ehleringer J R. Monsoonal precipitation responses of shrubs in a cold desert community on the Colorado Plateau. *Oecologia*, 1996, **106**: 8~17.
- [34] Flanagan L B, Ehleringer J R and Marshall J D. Differential up-take of summer precipitation among cooccurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant Cell Environ.*, 1992, **15**: 831~836.
- [35] Flanagan L B and Ehleringer J R. Stable isotopic composition of stem and leaf water: Applications to the study of plant water use. *Funct. Ecol.*, 1991, **5**: 270~277.
- [36] Donovan L A and Ehleringer J R. Water stress and use of summer precipitation in a Great Basin shrub community. *Funct. Ecol.*, 1994, **8**: 289~297.
- [37] Richards J R and Caldwell M M. Hydraulic lift: Substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia*, 1987, **73**: 486~489.
- [38] Caldwell M M and Richards J R. Hydraulic lift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water up-take by deep roots. *Oecologia*, 1989, **79**: 1~5.
- [39] White J W C. The climatic significance of D/H ratios in white pine in the Northeastern United States. Dissertation, New York: Columbia Univ., 1983.
- [40] Schiegl W E and Vogel J C. Deuterium content of organic matter. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1970, **7**: 307~313.
- [41] Schiegl W E. Deuterium content of peat as a palaeoclimatic recorder. *Science*, 1972, **175**: 512~513.
- [42] Epstein S, Yapp C J and Hall J H. The determination of the D/H ratio of nonexchangeable hydrogen in cellulose extracted from aquatic and land plants. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1976, **30**: 241~251.
- [43] Libby L M, Pondolfi L J, Payton P H, *et al.* Isotope tree thermometers. *Nature*, 1976, **261**: 284~288.
- [44] Epstein S and Yapp C. Isotope tree thermometers. *Nature*, 1977, **266**: 477~478.
- [45] Ramesh R, Bhattacharya S K and Gopalan K. Dendroclimatological implications of isotope coherence in trees from Kashmir Valley, India. *Nature*, 1985, **317**: 802~804.
- [46] Ramesh R, Bhattacharya S K and Gopalan K. Climatic correlations in the stable isotope records of silver fir (*Abies pindrow*) trees from Kashmir, India. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, **79**: 66~74.
- [47] Zeigler H, Osmond C B, Stickler W, *et al.* Hydrogen isotope discrimination in higher plants: correlation with photosynthetic pathway and environment. *Planta*, 1976, **128**: 35~92.
- [48] Schoeller D A and Santen E. van. Measurement of energy expenditure in humans by doubly labeled water method. *J. Appl. Physiol.*, 1982, **53**: 955~959.
- [49] Nagy K A. Ecological energetics. In: Huey R B, Pianka E R and Schoeller T W Eds. *Lizard Ecology*. Cambridge: Harvard University Press, 1983. 24~54.
- [50] Nagy K A, Siegfried W R and Wilson R P. Energy utilization by tree-ranging Jackass penguins *Spheniscus demersus*. *Ecology*, 1984, **65**: 1648~1655.
- [51] Ludlow M M, Froughton J H and Jones R J. A technique for determining the proportion of C₃ and C₄ species in plant samples using natural isotopes of carbon. *J. Agric. Sci. Camb.*, 1976, **87**: 625~632.
- [52] DeNiro M J and Epstein S. You are what you eat (plus a few ‰): the carbon isotope cycle in food chains. *Geol. Soc. Am. Abs. Prog.*, 1976, **8**: 834~835.
- [53] DeNiro M J and Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, **42**: 495~506.
- [54] Zeigler H. Hydrogen isotope fractionation in plant tissues. In: Rundel P W, Ehleringer J R, and Nagy K A, eds. *Ecological Studies*. Vol. 68. Stable Isotopes in Ecological Research. Heidelberg: Springer-Verlag, 1988. 105~123.
- [55] Sternberg L d S L. Oxygen and hydrogen isotope ratios in plant cellulose: Mechanisms and applications. In: Rundel P W, Ehleringer J R and Nagy K A, eds. *Ecological Studies*. Vol. 68. Stable Isotopes in Ecological Research. Heidelberg: Springer-Verlag, 1988. 124~141.
- [56] DeNiro M J and Cooper L W. Post-photosynthetic modification of oxygen isotope ratios of carbohydrates in the potato: Implications for paleoclimatic reconstruction based upon isotopic analysis of wood cellulose. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, **53**: 2573~2580.
- [57] Nagy K A. Doubly-labeled water studies of vertebrate physiological ecology. In: Rundel P W, Ehleringer J R and Nagy K A, eds. *Ecological Studies*. Vol. 68. Stable Isotopes in Ecological Research. Heidelberg: Springer-Verlag, 1988. 270~287.