

稳定氢氧同位素在定量区分植物水分利用来源中的应用

段德玉^{1, 2}, 欧阳华^{1*}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 全球气候变化下陆地生态系统的适应性是当前科学研究关注的主题之一, 了解生态系统如何响应及影响全球气候变化有利于人类对未来生存环境的预测和适应。生态系统中不同来源水分对植物生长相对贡献的大小一定程度上决定了生态系统对气候变化的响应方式、程度和响应结果, 因此跟踪和分析植物利用水分的来源是制定全球气候变化对策的一个重要研究内容。本文介绍了稳定氢氧同位素技术研究历史及其在定量区分植物利用水分的来源研究中的应用原理与具体方法。由于土壤水分在被植物根系吸收及随后沿导管向上传输的过程中, 与外界环境不发生水分交换, 因此不存在同位素的分馏过程, 所以植物茎木质部水分同位素组成能反映出植物利用的来源水分同位素信息。通过比较植物茎木质部水分与植物利用的不同来源水分同位素值, 利用二项或三项分隔线性混合模型 (two-or three-compartment linear mixing model), 可以估算出植物对不同来源水分的相对使用量。而由于植物叶片水分同位素组成受到周围环境的温度、湿度、降雨和土壤水分的异质性等许多因素的影响, 通过比较分析植物茎木质部水分和叶片水分同位素组成的差异可以得到植物周围环境的气候信息。植物利用水分的来源存在显著的季节性差异, 并且, 不同生活型植物在利用水分来源上存在明显不同。植物根系的分布及根深是决定植物利用水分来源的一个重要的因素, 表层和深层根系的相对分布及其活性影响着植物吸收水分的范围。当然, 利用线型分隔混合模型定量区分植物利用水分的不同来源, 还有许多值得改进的地方, 而且, 尽管稳定同位素技术在植物科学中的应用正迅速发展起来, 但利用稳定氢氧同位素来分析环境因素对植物影响的研究还只是刚刚展开, 还有许多方面值得去进一步探索。
关键词: $\delta^2\text{H}$; $\delta^{18}\text{O}$; 环境信息; 植物; 水分利用来源

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2007) 02-0655-06

全球变化研究开展以来, 陆地生态系统对全球环境变化的响应成为当前科学研究关注的主题之一^[1], 全球气候变化的一个重要方面就是区域降雨格局的变化, 降雨格局变化对生态水分平衡和植被分布都将产生重要的影响^[2]。植物吸收和利用水分的模式一定程度上决定了生态系统对环境水分状况发生改变时的响应结果^[3], 而且, 不同生活型植物具有不同的水分利用来源, 这在一定程度上也影响了气候变化时生态水分平衡与植被响应程度^[4]。因此, 对植物水分利用模式及水分来源的了解, 将有助于我们了解和预测降雨格局变化导致未来植被的时空变化规律^[5]。

但是在大气-土壤-植被系统中, 植物根系在水循环过程的功能非常难以评估, 利用传统的方法研究植物利用水分来源一直是非常困难的^[6]。而且, 对植物根系的直接研究(包括挖掘等手段)往往是破坏性的, 并且耗时而又不切实际^[7]。且在具有多个可利用水分来源的地区, 比如地下水位较浅或者附近有径流的地区, 通过直接方法来确定植物水分利用来源就显得更加困难了。

稳定同位素技术已广泛应用在生态学研究的许多领域当中, 通过比较分析稳定氢氧同位素组成

为调查植物水分利用来源提供了一个非常有效的方法, 通过二项或三项分隔线性混合模型(two-or three-compartment linear mixing model), 可以定量区分多个水源对植物相对贡献的大小^{[8][9]}。定量区分不同利用水分的来源对植物贡献大小及分析其变化对植物产生的影响, 不仅可以预测未来降水格局变化下植被结构和功能的相应变化, 以及生态系统对降水格局变化的可能响应, 还可以加深了解生态系统中不同组分水分循环过程, 从而有助于我们了解生态系统中的许多生物化学过程和物理过程。

1 稳定同位素技术概况

稳定同位素技术最早是应用在物理、地质和大气等其他学科的, 作为独特的示踪剂和对环境条件的指示器, 稳定同位素被广泛应用在岩石、生物、海洋、河流、地下水及各种矿床等领域内的研究, 成为解决许多重大地质地球化学问题的强大武器^[10]。并且, 研究人员很早就开始使用氧同位素来测定古环境条件, 并在地质学中的古环境重建研究中得到了广泛而成功的应用, 为古气候的重建提供了有用的信息, 对史前、尤其是第四纪古环境等古气候方面的研究起到了很大的促进作用^[11]。

20 世纪 50 年代初, 同位素技术开始应用于水

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2005CB422005) 和中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCX3-SW-339)

作者简介: 段德玉 (1973 -), 男, 博士, 主要从事陆地生态系统格局与过程的研究工作。

*通讯作者: ohua@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2006-08-16

科学领域并解决了水文学和水文地质学中的一些重大问题^[12]。此后,随着科技的发展尤其是同位素分析技术的发展,水的稳定同位素分析逐渐成为水科学领域的现代研究方法之一,通过研究水体本身及某些溶解盐的同位素组成,获得了传统方法不可能得到的一些重要信息^[13]。

由于稳定同位素始终贯穿于生态系统的复杂生物、物理和化学过程,同位素分析技术能够在时间和空间尺度上整合反映生物、物理、生态过程对环境变化的响应,并逐渐成为人们深入了解生态系统对环境变化响应的重要工具^{[14][15][16]}。1980年以来,稳定同位素分析已成为一项重要的生态学研究手段,并逐渐形成了“同位素生态学”这一新兴领域,1998年在加拿大召开了“稳定同位素技术在生态学中的应用”的国际会议,一致认为该方法潜力巨大^[17]。如今,作为一种重要的生态学研究手段,稳定同位素技术在生态学的许多领域得到广泛的应用。

随着稳定同位素技术的发展,如今,稳定同位素在植物科学中的应用正迅速发展起来,越来越多的研究正在尝试把氢氧同位素组成的判断作为一个工具来分析环境因素对植物的影响。

2 稳定氢氧同位素跟踪水分利用研究原理

植物组织水氢氧稳定同位素信息来源于植物利用的不同环境水分,环境水的同位素组成与气候存在着密切相关关系^[18]。只有完全熟悉了环境中不同来源水分的稳定氢氧同位素分布特点,并了解了决定其分布的物理化学过程,才能有效地利用同位素技术分析植物利用水分的来源。

影响不同水源同位素组成的是同位素分馏过程,影响同位素分馏的因素包括蒸发、凝聚、降落、渗透等物理化学过程^[17]。降雨是地球上一切水资源的根本来源,在其后的循环过程中,降水经历了凝结、蒸发、海拔高度、温度等一系列物理化学过程的变化。表层土壤水由于蒸发而产生水分氢氧同位素的分馏,因此可能比下层土壤水更加富集重同位素组成,土壤剖面中不同层次土壤水分稳定氢氧同位素的组成存在着显著的差异^[19]。因此,由于经历了不同的循环过程,自然界中不同来源水分稳定氢氧同位素组成存在着广泛差异,这些差异是利用稳定同位素技术定量区分植物利用水分的不同来源对植物生长相对贡献的基础^[9,15]。

但是,与这些物理化学过程相反,在植物根系对土壤水分的吸收过程中,稳定氢氧同位素一般不会发生分馏;水分被植物根系吸收后沿木质部向上运输过程中是液流形式进行的,这种运输方式发生在植物体内,水分不存在汽化现象,因而一般也不存在稳定氢氧同位素的分馏现象^[8]。也就是,水分

在被植物根系吸收与从根部向上运输过程中均不发生稳定氢氧同位素的分馏,植物导管内水分同位素保持与来源水分相同的同位素组成。根对水分的吸收尽管改变了土壤水分含量,但并不改变土壤水分同位素组成。因此,植物茎木质部水分的同位素组成能反映出植物利用的不同水源稳定氢氧同位素信息。

如果不同来源水分的同位素组成差异显著,那么对比植物木质部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。

3 稳定氢氧同位素在植物水源研究中的定量方法

植物体内水分的同位素组成是各种来源水分同位素组成共同组合的结果^[20-21]。通过分析对比植物木质部水分与各种水源的同位素组成,可以确定不同来源的水分对植物组织水分的相对贡献大小。利用二项或三项分隔线性混合模型(two-or three-compartment linear mixing model)^[22-23],可以估算出植物对不同水源的相对使用量。

当植物有两种水分来源时:

$$\delta D = x_1 \delta D_1 + x_2 \delta D_2 \quad (1)$$

$$\delta^{18}O = x_1 \delta^{18}O_1 + x_2 \delta^{18}O_2 \quad (2)$$

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (3)$$

当存在三个或三个以上水分来源时,计算公式以此类推:

$$\delta D = x_1 \delta D_1 + x_2 \delta D_2 + x_3 \delta D_3 \quad (4)$$

$$\delta^{18}O = x_1 \delta^{18}O_1 + x_2 \delta^{18}O_2 + x_3 \delta^{18}O_3 \quad (5)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1 \quad (6)$$

其中, $\delta D(\delta^{18}O)$ 为植物木质部水分的稳定氢或氧同位素组成, $\delta D_1(\delta^{18}O_1)$ 、 $\delta D_2(\delta^{18}O_2)$ 、 $\delta D_3(\delta^{18}O_3)$ 为水源1、2、3的稳定氢(氧)同位素组成, x_1 、 x_2 、 x_3 为水源1、2、3在植物所利用的水分总量中所占的百分数。

4 植物不同部位稳定同位素组成的环境信息

如上所述,植物茎木质部水分保持与利用水源相同的同位素组成。但是,与此不同的是,植物叶片水分同位素组成与环境气候情况有着密切的相关关系,叶片水分同位素组成受到许多因素的影响,包括植物周围环境的温度、降雨和土壤水分的异质性。通过比较分析植物茎木质部、叶片水分同位素组成通常可以得到取样时植物周围的环境气候信息^[24]。

周围环境中温度、湿度等条件影响着植物叶片水分稳定氢氧同位素的组成^[25]。由于蒸腾、蒸发等作用,引起叶片表面水分轻稳定同位素较快的流失,造成在植物叶片表面重同位素组成的富集^[26],并且由此在叶片中产生了一个稳定同位素梯度,这

一点为研究植物内部以及植物与环境之间的水分运动提供了一个有效的方法^[27]。

Yakir等认为,在植物的蒸腾期间,相对于土壤水分,环境中的相对湿度更能引起植物叶片水中重氢氧同位素的富集,因此,同潮湿条件相比,生长在干旱条件下的植物叶片水中往往会富集大量的重氢氧同位素组分^{[24][27]}。

另外,周围环境条件对植物的生物合成具有重要影响。作为植物光合作用固定有机物中氢的根本来源,叶片水分稳定同位素组成也影响着有机物的稳定同位素组成。因此,植物有机物的稳定氢氧同位素组成也经常用来研究植物周围的环境条件。Yakir等认为,叶片水稳定氢氧同位素组成一定程度上控制着纤维素的稳定氢氧同位素^[27],但是,由于不同植物在合成纤维素过程中利用水源等生理机制不同,有可能植物叶片水分和叶片纤维素的稳定氢氧同位素没有必然的联系^[28]。

一般认为,叶片水分中的稳定氢氧同位素组成只能代表取样时间的气候数据信息,而叶片纤维素中的稳定氢氧同位素组成是比较完善而又长期的指标,反映了在整个生长期间的叶片蒸汽压与周围环境关系,代表了叶片的整个生长时期外界水分环境的积累信息^[28]。植物稳定碳同位素组成同植物的水分利用效率呈显著正相关^[29],如果把叶片碳同位素与纤维素稳定氢氧同位素结合起来,有可能更加准确地估算植物的水分利用效率、反映植物生长季节的环境水分条件。

5 不同植物水分利用来源的差异

由于植物木质部水分保留了被根系吸收前的水分同位素信息,因此可利用植物木质部水分作为天然示踪剂来分析植物的水分利用来源。比较植物水与土壤水、径流水、雨水等各种来源水分的稳定氢氧同位素组成,可定量区分各来源水分对植物生长的相对贡献^[7]。

不同生活型植物利用不同来源的水分。利用稳定同位素技术对植物水分利用来源进行跟踪研究,常常得到了令人意料不到的、甚至是与常理相背的结果^[3]。比如尽管离河水很近,很多河滨植物事实上却很少利用河水^[20]。常绿植物一般只使用雨水,而落叶植物几乎只使用比较可靠的深层土壤水或者地下水;在非洲西部潮湿的热带草原地区,无论是干旱还是湿润季节,草本植物和木本植物都使用表层土壤水分;一般看来,高大成熟的树木较年轻树木更加倾向于使用深层土壤水^{[20][21]}。

植物在利用水分来源上存在着较大的时空差异,尤其在干旱地区,并且不同植物其时空差异也存在着很大的不同^[23]。干旱地区的耐旱物种只有在

雨水较充足的季节才利用表层土壤水,而在雨水不可靠或雨量较小时并不利用来自降雨的表层土壤水分。在干旱季节中,植物一般多只使用深层土壤水和地下水,并不使用偶尔一场降雨量不大的雨水,但是,当雨季来临之后,植物的根系能迅速地转为吸收表层土壤中的雨水^[18]。在巴拿马的季节性干旱森林中,越是干旱季节,植物越倾向于使用较稳定地深层土壤水,因此,植物在水分匮乏时能够一直保持稳定、甚至还不断增加的水分利用总量,从而避免生存受到威胁^[30]。不同植物水分利用来源的季节性差异同样也与植物种类有关,叶片季节性变化小的植物能在干旱情况下多使用深层土壤水或者地下水^[3]。

不同来源水分的广泛同位素组成差异是利用同位素技术定量区分植物水分来源的基础。以上方法是基于不同来源水分之间存在稳定氢氧同位素值的显著差异。如果植物周围环境同位素组成之间没有明确的不同特征,我们很难得出植物功能与环境之间的关系。

植物不同来源水分都是根源于大汽水,但由于在全球范围内的不同循环模式和循环过程,各种水分的稳定氢氧同位素组成具有广泛的时空分布异质性。但事实上,在一些地区有时也存在水分稳定氢氧同位素分布的相对均质性^[9]。在这些地方,利用稳定同位素自然丰度的相对差异对植物水分利用来源进行跟踪和分析是难以实现的。Brunel等^[31]认为,在稳定氢氧同位素的测量过程中,包括取样、预处理、实验分析等过程在内,同位素值的相对误差范围在 $\pm 5\%$,因此,如果不同来源水分的稳定氢氧同位素组成的相对差异在10%以内,用这种方法进行水分来源的定量分析就超出了其技术的灵敏值^[9]。较小的稳定同位素组成差异就降低了通过同位素技术对植物利用水分来源定量分析的可行性。

Zencich等也发现了由于不同水源之间同位素组成的相对均质性造成难以判断植物利用水分来源的问题^[18]。大量的降雨与根系对土壤水分的提升作用,也可能造成各层土壤水稳定氢氧同位素组成之间没有明显差异。因此,在实验计划实施之前,有必要对取样的时间和地点慎重考虑。

6 植物水分利用来源与植物根系的关系

植物对水分的吸收同植物根系密切相关,表层和深层根系的分布及根的活性影响植物吸收水分的范围,植物根系的分布及根深是决定植物水分利用来源的一个重要的因素。在干旱和半干旱地区,许多多年生植物的根系具有二态性,表层土壤的根系可以吸收来自生长季节降雨的水分,而深根可以吸收来自上年冬天和春天降雨的深层土壤水^[32]。但

是,在许多干旱和半干旱地区,在降雨水分的获得并不可靠的时候,多年生植物大多并不保持表层土壤根系的活性,研究认为,干旱时维持表层根系活性的耗费远远大于植物在表层土壤的获得^[6]。然而,当夏天降雨增加的时候,这些植物往往能够改变他们功能根的深度,开始使用表层土壤中的大量水分

植物对表层土壤水分的响应并不同水分的可获得性呈线性关系,有时需要一场达到一定雨量的降雨来刺激这些植物表层根系的活性,在干旱季节或者干旱地区,植物在利用这些有限的降雨时有一个最小降雨量的阈值,只有当降雨量达到一定的阈值时,植物根系才开始形成并保持吸收表层土壤水分的功能,这种响应对干旱地区的植物能够同时利用上年冬天和春天的降雨与本年度生长季节的降雨是非常重要的^[20]。在干旱地区,吸收深层土壤水和地下水的植物具有更大的生存能力。在湿润的季节,由于雨水较多,一般情况下,植物主要利用来自于降雨的上层土壤水,地下水的利用程度主要取决于地下水位的高低、表层土壤的有效含水量等各种因素^[8]。

由于可以吸收多层次的土壤水分,具有二态性根系的植物在干旱地区往往占有更大的生存优势。但是同样,具有二态性根系植物在水分利用来源上也有非常明显的季节性的变化^[20]。

7 展望

当然,这种利用线型分隔混合模型来定量计算植物不同水分来源的方法,还有许多需要改进的地方。由于水分的同位素组成是一个对环境信息非常敏感的指标数据,因此,需求对取样的设计以及取样后对样品的各种处理过程都非常严格。尽量避免样品的蒸发以及其它水分对样品的污染,这些都可能造成对计算结果的严重影响,从而高估或者低估某一来源水分对植物生长的相对贡献。而且,现实环境中的植物水分利用来源往往比较复杂,当植物利用水分的来源超过了3个时,利用这种方法也往往很难做到定量植物水分来源。

目前,稳定氢氧同位素技术更多的还是应用在对水文学的研究上,比如对降雨、流域等水循环研究以及对土壤水、地下水的动态跟踪研究^[33]。而当水分进入生态系统中在土壤-植被系统中循环时,对其同位素变化情况研究相对较少。尽管稳定同位素技术在植物科学中的应用正迅速发展起来,但把稳定氢氧同位素组分的判断作为一个工具来分析环境因素对植物影响研究还只是刚刚展开,并且把稳定氢氧同位素技术应用在植物生理方面的研究工作,目前还相对较少。因此,利用稳定氢氧同位素技术来判断植物水分利用来源的研究还有许多方

面值得去探索。

而在这个领域,稳定同位素技术将有着广泛的应用价值,不仅可以用来跟踪水分在生态系统中一些物理、化学和生物过程中的循环途径,了解植被的水分利用来源,还可以用来了解生态系统中长期水分状况以及生态系统在这种状况下的发展过程,这些都有利于我们了解生态系统的结构、功能和过程,为我们利用、建设生态系统、改善生态环境提供一定的理论依据。

利用稳定氢氧同位素可以从整体上为研究水文循环提供新的手段,解决水文循环中的一些重大关键问题和生产实践问题。在以后的研究工作中,还应重视利用同位素技术研究植物体内的水分运输,特别是植物体内组织、器官之间的运输以及不同组织在输水过程上的差异。稳定氢氧同位素在植物水分研究中的另外一个前景就是其可能为植物水分欠缺程度提供一个量化的指标,从而解决研究植物长期水分利用效率的困难^[15]。

参考文献:

- [1] VITOUSEK P M. Beyond global warming: Ecology and global change[J]. *Ecology*, 1994, 75: 1861-1876.
- [2] NEILSON R P. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5: 362-385.
- [3] EWE S M L, SILVEIRA L D, STERNBERG L, et al. Water-use patterns of woody species in pineland and hammock communities of South Florida[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 118: 139-148.
- [4] CANADELL J, JACKSON R B, Ehleringer J R, et al. A global review of rooting patterns. II. Maximum rooting depth[J]. *Oecologia*, 1996, 108: 583-595.
- [5] SCHIMMEL D S. Population and community processes in the response of terrestrial ecosystems to global change[C]//KAREIVA P M, KINGSOLVER J G, HUEY R B. *Biotic interactions and global change*. Sunderland, USA: Sinauer Associates, 1993: 45-54.
- [6] MEINZER F C, CLEARWATER M J, GOLDSTEIN G. Water transport in trees: current perspectives, new insights and some controversies[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45: 239-262.
- [7] 张建锋, 周金星. 林木根系衰老研究方法与其机制[J]. *生态环境*, 2006, 15(2): 405-410.
ZHANG Jianfeng, ZHOU Jinxing. Research methods and mechanism of senescence of tree root: A review[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 405-410.
- [8] 石辉, 刘世荣, 赵晓广. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 163-166.
SHI Hui, LIU Shirong, ZHAO Xiaoguang. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in water circulation[J]. *Journal of soil and water conservation*. 2003, 17(2): 163-166.
- [9] STEPHEN SO BURGESS, MARK A ADAMS, NEIL C TURNER, et

- al. Characterization of hydrogen isotope profiles in an agroforestry system: implications for tracing water sources of trees[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45: 229-241.
- [10] 丁梯平. 稳定同位素地球化学研究新况[J]. *地学前沿*, 1994, 1(3-4): 191-198.
DING Tiping. On present state of stable isotope geochemistry[J]. *Earth science frontiers*, 1994, 1(3-4): 191-198.
- [11] 赖旭龙, 杨洪. 古代生物分子在第四纪研究中的应用[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 457-470.
LAI Xulong, YANG Hong. Ancient biomolecular and their applications in quaternary sciences[J]. *Quaternary sciences*, 2003, 23(5): 457-470.
- [12] 李大通, 张之淦. 核技术在水文地质中的应用指南[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-287.
LI Datong, ZHANG Zhigan. Guide for nuclear technology on application in hydrology and geology[M]. Beijing: Geology Press, 1990: 1-287.
- [13] 吴锦奎, 丁永建, 王根绪, 等. 同位素技术在寒旱区水科学中的应用进展[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 509-516.
WU Jinkui, DING Yongjian, WANG Genxu, et al. Advance on application of isotopic techniques in water sciences in cold and arid regions[J]. *Journal of glaciology and geocryology*, 2004, 26(4): 509-516.
- [14] EHLERINGER JR, BOWLING DR, FLANAGAN LB, et al. Stable isotope and carbon cycle processes in forests and grasslands [J]. *Plant biology*, 2002, 4: 181-189.
- [15] 严昌荣, 白涛, 蔡绍平, 等. 稳定性同位素技术在植物水分研究中的应用[J]. *湖北林业科技*, 1998, 4: 29-33.
YAN Changrong, BAI Tao, CAI Shaoping, et al. Application of stable isotope technique in the research of plant water use[J]. *Forest Science and Technology in Hubei*, 1998, 4: 29-33.
- [16] 曹燕丽, 卢琦, 林光辉. 氢稳定性同位素确定植物水源的应用与前景[J]. *生态学报*, 2002, 22(1): 111-117.
CAO Yanli, LU Qi, LIN Guanghui. Review and Perspective on Hydrogen Stable Isotopes Technique in Tracing Plant Water Sources Researches[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 111-117.
- [17] HOBSON K A, WASENAAR L I. Stable isotope ecology: an introduction[J]. *Oecologia*, 1999, 120: 312-313.
- [18] ZENCICH S J, FROEND R H, TURNER J V, et al. Influence of groundwater depth on the seasonal sources of water accessed by *Banksia* tree species on a shallow, sandy coastal aquifer[J]. *Oecologia*, 2002, 131: 8-19.
- [19] ALLISON G B, LEANEY F W. Estimation of isotopic exchange parameters, using constant-feed pans[J]. *Journal of Hydrology*, 1982, 55: 151-161.
- [20] DAWSON T E, PATE J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phreatophytic plants of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation[J]. *Oecologia*, 1996, 107: 13-20.
- [21] JACKSON P C, MEINZER F C, BUSTAMANTE M. Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem[J]. *Tree Physiology*, 1999, 19: 717-724.
- [22] WHITE J W, COOK E R, LAWRENCE J R. The D/H ratios of sap in trees: implications of water sources and tree ring D/H ratios[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 237-246.
- [23] GREGG, J. The differential occurrence of the mistletoe, *Phoradendron juniperinum*, on its host, *Juniperus osteosperma* in the Western United States[D]. Salt Lake City, USA: University of Utah, 1991: 78.
- [24] YAKIR D, TING I, DENIRO M J. Natural abundance $^2\text{H}/^1\text{H}$ ratios of water storage in leaves of *peperomiacongesta* HBK during water stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 144: 607-612.
- [25] FARRIS F, STRAIN B R. The effects of water stress on leaf H_2^{18}O enrichment[J]. *Radiation and Environmental Biophysics*, 1978, 15: 167-202.
- [26] KIM S G, WONG S C, JEAN Y W H. ^{18}O Spatial Patterns of Vein Xylem Water, Leaf Water, and Dry Matter in Cotton Leaves[J]. *Plant Physiology*, 2002, 130: 1008-1021.
- [27] YAKIR D, DENIRO M J, EPHRATH J E. Effects of water stress on oxygen, hydrogen and carbon isotope ratios in two species of cotton[J]. *Plant Cell and Environment*, 1990, 13: 949-955.
- [28] WALKER B H. Implications of global change for natural and managed ecosystem: a synthesis of GCET and related research[M]. IGBP Book Series 4. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [29] 陈世莘, 白永飞, 韩兴国. 稳定性碳同位素技术在生态学研究中的应用[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 549-560.
CHEN Shiping BAI Yongfei, HAN Xingguo. Applications of stable carbon isotope techniques to ecological research[J]. *Acta Phytotologica Sinica*, 2002, 26(5): 549-560.
- [30] MEINZER F C, ANDRADE J L, GOLDSTEIN G. Partitioning of soil water among canopy trees in a seasonally dry tropical forest[J]. *Oecologia*, 1999, 121: 293-301.
- [31] BRUNEL J P, WALKER G R, KENNETT S A K. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 167: 351-368.
- [32] WILLIAMS D G, EHLERINGER J R. Intra- and inter-specific variation for summer precipitation use in pinyon-juniper woodlands[J]. *Ecological Monographs*, 2000, 70: 517-537.
- [33] GAZIS C, FENG X H. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths[J]. *Geoderma*, 2004, 119: 97-111.

Application of stable hydrogen and oxygen isotope in analyzing plant water use sources

DUAN Deyu^{1,2}, OUYANG Hua¹

1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. The Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China

Abstract: Adaptation of terrestrial ecosystem to global climate change, which has strong influence on human existence and development, is being paid more and more attentions. The research of terrestrial ecosystem response to climate change is crucial for human's understanding and forecasting future environmental changes. The relative contributions of different water use sources to plants will determine the fate of the response of ecosystem to global climate changes. Tracing water use sources by plants is helpful for human to determine the strategy to adapt to future environmental conditions. This paper described the principle and methods of applying hydrogen and oxygen isotope in tracing plant water use sources. Mechanisms of water uptake by plant roots and water transportation in plant xylem are non-fractionating because evaporation doesn't happen, hence plant xylem water has the same stable hydrogen and oxygen isotope composition with soil water used by plants. By analyzing hydrogen and oxygen isotope composition of plant xylem water and potential plant water sources, we can determine quantitatively the contributions of the sources to plants using two-or three-compartment linear mixing model. In contrast to plant xylem water, stable isotope composition of leave water is influenced by temperature, humidity, precipitation and many other environmental variables. Much environmental and climatic information could be understood by analyzing the difference of stable isotope composition between plant xylem water and leave water. For many species, the water sources vary with seasons, and plants with different lifestyle has different water use sources. Diversity of plant root system distribution has important influence on plant water use sources. Surface roots could absorb the water in upper soil while deeper roots often absorb groundwater or the water in deeper soil. Nowadays, stable isotopic technology has been applied in more and more ecological fields, however, further test and improvement are still needed in applying the linear mixing model to determine plant water use sources.

Key words: $\delta^2\text{H}$; $\delta^{18}\text{O}$; environmental information; plant; water use sources