

DOI: 10.5846/stxb201802080345

于静洁, 李亚飞. 稳定氢氧同位素定量植物水分来源的不确定性解析. 生态学报, 2018, 38(22): - .

Yu J J, Li Y F. Uncertainties in the usage of stable hydrogen and oxygen isotopes for the quantification of plant water sources. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

稳定氢氧同位素定量植物水分来源的不确定性解析

于静洁^{1,2,*}, 李亚飞^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100190

摘要: 稳定氢氧同位素技术被广泛运用于生态系统、特别是干旱区生态系统中植物水分来源的研究, 其理论假设为“水分被植物根系吸收并向木质部运输过程中不发生氢氧同位素分馏”。生态系统中不同水源的氢氧同位素组成普遍存在显著差异, 为从水源混合体中区分出各水源的贡献率提供了前提条件。但在实际应用过程中, 诸多因素导致稳定氢氧同位素技术定量植物水分来源的结果具有不确定性。综合已有研究并加以分析, 举证说明植物吸收水分相对于水源同位素变化的滞后性、水源同位素的季节性变化、蒸发作用和水源之间的混合作用对水源同位素的影响等导致植物水分来源定量结果不确定性的几个因素, 以期为今后稳定氢氧同位素技术在植物水分来源领域的应用提供参考。

关键词: 稳定氢氧同位素技术; 植物水分来源; 不确定性; 植物吸水滞后性; 水源动态变化

Uncertainties in the usage of stable hydrogen and oxygen isotopes for the quantification of plant water sources

YU Jingjie^{1,2,*}, LI Yafei^{1,2}

1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Stable hydrogen and oxygen isotope analysis has been used widely to study the usage of plant water in ecosystems, especially in arid ecosystems. The theoretical basis of this analysis is that hydrogen and oxygen isotopes do not fractionate during the processes of root water absorption and water transport to the plant xylem. Dramatic differences in hydrogen and oxygen isotope ratios exist among various water sources within an ecosystem, which is a pre-condition of using stable hydrogen and oxygen isotope analysis to distinguish the proportional contributions of different water sources. However, some factors have caused uncertainty in the quantification of plant water sources using stable hydrogen and oxygen isotope analysis. This study has discussed previous research as examples of the factors leading to this uncertainty, such as the retention of root water uptake in relation to the dynamics of the isotopic ratio of water sources, the seasonal variation of isotopic water sources, and the variation of the isotopic ratio of water sources caused by evaporation and mixing of different water sources. Our research can act as a reference for future research into the quantification of plant water sources using stable hydrogen and oxygen isotopic analysis.

Key Words: stable hydrogen and oxygen isotopes; plant water use; uncertainty; lag of plant water uptake; dynamics of water sources

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571029, 41371059)

收稿日期: 2018-02-08; 修订日期: 2018-09-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yujj@igsnrr.ac.cn

稳定氢氧同位素技术因被应用于研究植物水分来源时具有较高的灵敏度和准确性,并且优于对植物具有破坏性的根系调查法,因而成为生态水文研究的一种常用手段^[1-2],特别是被广泛运用于干旱区生态水文研究^[3-10]。植物根系从土壤中吸收水分并运输到木质部的过程不发生氢氧同位素分馏^[11],这为从水源混合体中区分出植物的水分来源提供了理论前提;生态系统中不同水源的氢氧同位素组成存在广泛差异,是从水源混合体中区分出各水源贡献率的前提条件^[11]。

稳定氢氧同位素技术还可用于定量植物水分来源,以及研究植物水分来源的动态变化,如利用稳定氢氧同位素可以示踪不同群落类型中植物对各水源依赖程度的时间变化规律^[1,12-13]。但基于稳定氢氧同位素技术定量植物水分来源,其结果仍有较大的不确定性^[14],如:多水源植物水分来源定量无法得到各水源贡献率的唯一解^[15];水源的交互作用即“生态水文联系”所造成的水源氢氧同位素组成较为接近^[16],植物木质部水分的同位素相对于水源的同位素组成存在滞后性等^[17]。

本文对利用稳定氢氧同位素技术定量植物水分来源研究中存在的导致定量结果不确定性的一些因素进行分析整理,并以已有研究成果为例举证说明,以期今后利用稳定氢氧同位素定量植物水分来源研究的改进提供参考。

1 利用稳定氢氧同位素定量植物水分来源的原理

植物从土壤中吸收水分,而土壤水由降水、河水、地下水等水源补给。植物根系从土壤中吸收水分并运输到木质部的过程,不发生氢氧同位素分馏,以及自然界不同水源的氢氧同位素组成存在广泛差异,为利用稳定氢氧同位素技术从水源混合体中区分出各水源的贡献率提供了前提条件^[11]。

利用稳定氢氧同位素确定植物水分来源的基本原理为:以植物木质部水分的氢氧同位素比率为基准,寻找与其氢氧同位素比率相近的土壤水所处层位,该层位即为植物的主要吸水层位^[1,15];各潜在水源补给土壤水后,若没有发生明显的氢氧同位素分馏,潜在水源混合体的氢氧同位素比率便等同于其所补给的对应土壤层位土壤水的氢氧同位素比率。

自然界水样中的氢氧同位素比率通常采用 δ 值来表示:

$$\delta_{\text{sample}} = \left[\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (‰) \quad (1)$$

式中, δ_{sample} 是样品的氢(或氧)的同位素组成(‰), R_{sample} 是样品中氢(或氧)的重同位素和轻同位素丰度之比($^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), R_{standard} 是维也纳标准平均海水(Vienna Standard Mean Ocean Water, V-SMOW)的氢(或氧)的重同位素和轻同位素丰度之比($^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)。

获取水分氢氧同位素比率值的常用方法是:周期性采集植物木质部和土壤样品并抽提获取水分样品、以及采集降水、河水、地下水等潜在水源样品,经过滤后利用液态水同位素分析仪获取各水分样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 值。

植物吸收土壤水的层位为连续变量,在实际定量植物水分来源时,可将土壤层概化为若干层,每一层视为植物的一个水源。假设 $\delta^{18}\text{O}_p$ ($\delta^2\text{H}_p$) 为植物木质部水分的 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) 值; $\delta^{18}\text{O}_{Si}$ ($\delta^2\text{H}_{Si}$) 为某 i 层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) 值,则某 i 层土壤水对植物水分的贡献率 f_i 计算公式如下:

$$\sum_{i=1}^n f_i \delta^{18}\text{O}_{Si} (^2\text{H}_{Si}) = \delta^{18}\text{O}_p (^2\text{H}_p) \quad \left(\text{其中} \sum_{i=1}^n f_i = 1 \right) \quad (2)$$

假设 $\delta^{18}\text{O}_{wj}$ ($\delta^2\text{H}_{wj}$) 为某 j 种潜在水源的 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) 值,则某 j 种潜在水源(降水、河水或地下水)对某 i 层土壤水的贡献率 f_{ij} 的计算公式如下:

$$\sum_{i=1}^n f_{ij} \delta^{18}\text{O}_{wj} (^2\text{H}_{wj}) = \delta^{18}\text{O}_{Si} (^2\text{H}_{Si}) \quad (3)$$

“某 i 土壤水对植物水分的贡献率 f_i ”和“某 j 种潜在水源对某 i 层土壤水贡献率 f_{ij} ”相乘,同类别潜在水源的比例相加,即为某 j 种潜在水源对植物的贡献率,计算公式如下:

$$f_j = \sum_{i=1}^n (f_i \cdot f_{ij}) \quad (4)$$

在计算植物水分来源前,首先要确定植物有几个水源,然后决定采用什么样的方法进行计算(图1)。

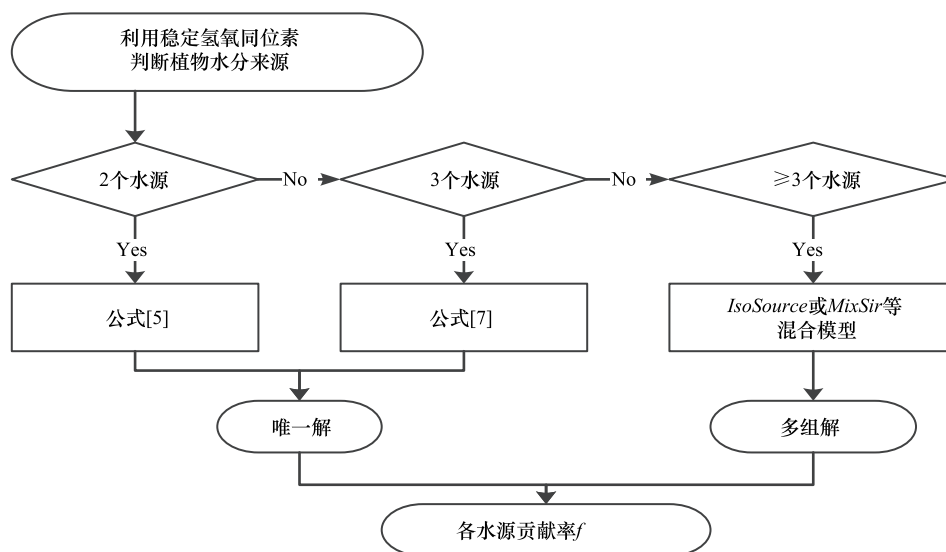


图1 植物水分来源计算方法判断流程图

Fig.1 The flow chart of determining the methods of calculating plat water sources

假设植物有两种潜在水源 a、b,潜在水源的氢氧同位素比率分别为 $\delta^{18}O_a$ 、 $\delta^{18}O_b$ (和 δ^2H_a 、 δ^2H_b ,在此以 $\delta^{18}O$ 为例),潜在水源的贡献率分别为 f_a 、 f_b ,则可建立方程组:

$$\begin{cases} f_a \cdot \delta^{18}O_a + f_b \cdot \delta^{18}O_b = \delta^{18}O \\ f_a + f_b = 1 (0 \leq f_a \leq 1, 0 \leq f_b \leq 1) \end{cases} \quad (5)$$

据此,潜在水源 a、b 的贡献率求解公式分别如下:

$$\begin{cases} f_a = \frac{\delta^{18}O - \delta^{18}O_b}{\delta^{18}O_a - \delta^{18}O_b} \\ f_b = \frac{\delta^{18}O_a - \delta^{18}O}{\delta^{18}O_a - \delta^{18}O_b} \end{cases} \quad (6)$$

假设植物有三种潜在水源 a、b、c,潜在水源的氢氧同位素比率分别为 $\delta^{18}O_a$ 、 $\delta^{18}O_b$ 、 $\delta^{18}O_c$ (和 δ^2H_a 、 δ^2H_b 、 δ^2H_c),潜在水源的贡献率分别为 f_a 、 f_b 、 f_c ,则可建立方程组:

$$\begin{cases} f_a \cdot \delta^{18}O_a + f_b \cdot \delta^{18}O_b + f_c \cdot \delta^{18}O_c = \delta^{18}O \\ f_a \cdot \delta^2H_a + f_b \cdot \delta^2H_b + f_c \cdot \delta^2H_c = \delta^2H \\ f_a + f_b + f_c = 1 (0 \leq f_a \leq 1, 0 \leq f_b \leq 1, 0 \leq f_c \leq 1) \end{cases} \quad (7)$$

据此,潜在水源 a、b、c 的贡献率求解公式分别如下:

当植物水源为 3 个以上时, δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 所建立的方程组显然无法得到各水源贡献率的精确解^[14]。IsoSource 线性模型^[18] 和 MixSir 贝叶斯模型^[19] 即是解决 3 个以上水源的植物水分来源问题,通过混合模型得到多组可能解,以统计值(如平均值等)反映植物水分来源特征(图2所示,图中所展示数据来源于文献^[20])。

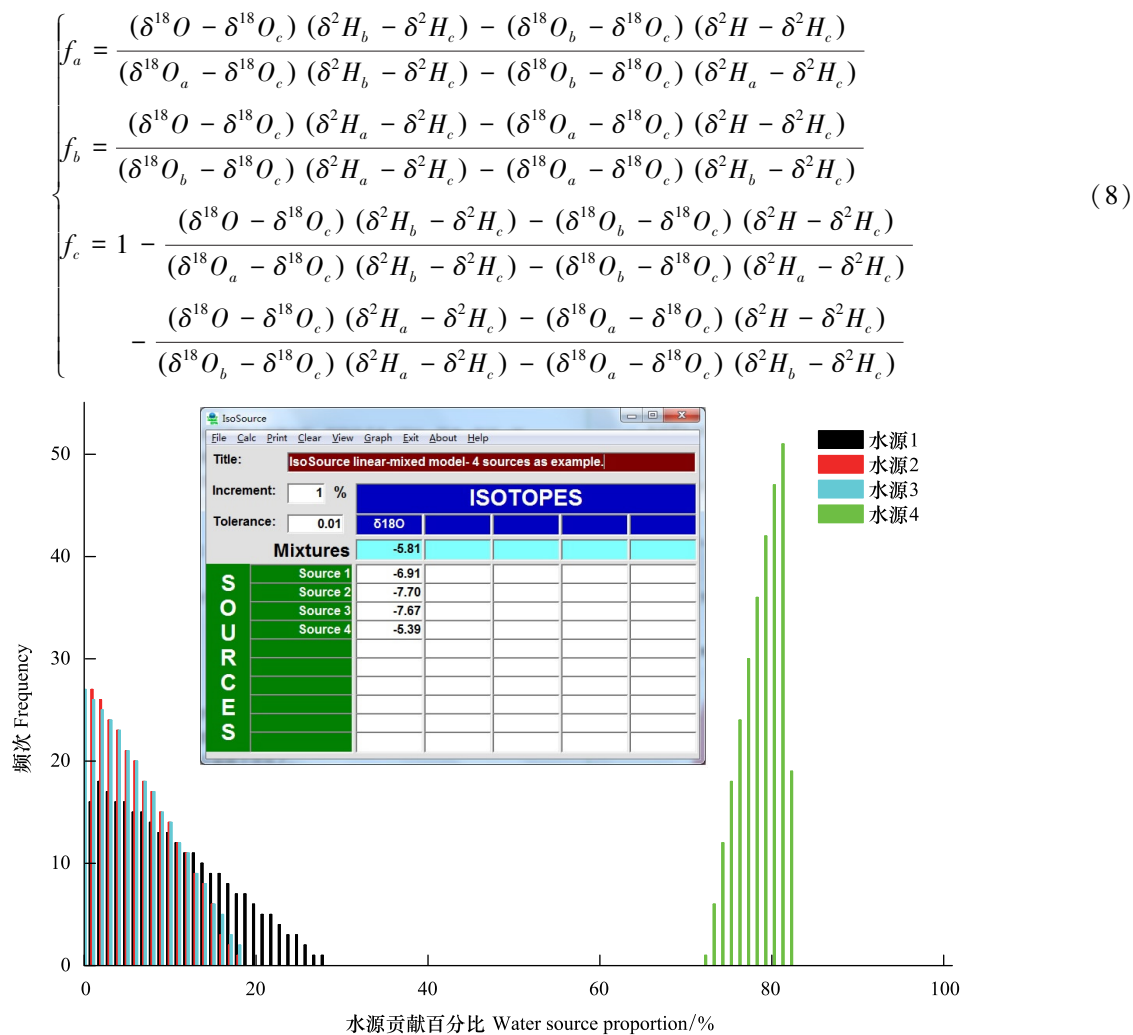


图2 利用 IsoSource 线性混合模型计算 3 个以上水源的植物水分来源示意图

Fig.2 The schematic figure of calculating the plant water sources from more than three sources with the linear-mixed model called "IsoSource"

图中所展示数据来源于文献[20]; 横轴表示某种水源的贡献百分比, 纵轴表示在对应的贡献百分比上各水源出现的次数; IsoSource 模型见网址: <https://www.epa.gov/eco-research/stable-isotope-mixing-models-estimating-source-proportions>

2 利用稳定氢氧同位素定量植物水分来源的不确定性因素

2.1 植物吸收水分的滞后性

植物根系吸收水分并将其运送到木质部, 需要一定的时间, 因此植物根系周围的土壤水需要经历一段时间后才能能在植物木质部中被检测到(图3), 如: 草本植物 *Fragaria virginiana* 根系周围的水分出现在木质部水分中, 需要 1—1.5 h; 灌木 *Lindera benzoin* 根系周围的水分出现在木质部中, 需要 7.5—11 h; 而乔木 *Tilia heterophylla* 根系周围的水分出现在木质部中, 需要 30—37 h; 即植物吸收水分存在滞后性^[17]。

在定量植物水分来源时, 研究者们通常会同步采集植物木质部水分样品、土壤样品, 以及降水、河水和地下水样品^[9, 16, 21]。但事实上, 水源的补给需要一定的时间(图3), 不论是降水、河水、地下水补给土壤水的过程, 还是土壤水被植物吸收利用的过程。植物吸收水分的滞后性, 决定了“利用稳定氢氧同位素技术研究植物水分来源”的时间尺度不能太短, 即样本周期至少要长于植物吸水的滞后时间。因此在研究植物水分来源定量问题前, 首先应研究植物水分利用的滞后性问题, 弄清楚各水源补给的滞后周期, 可提高定量结果准确性。

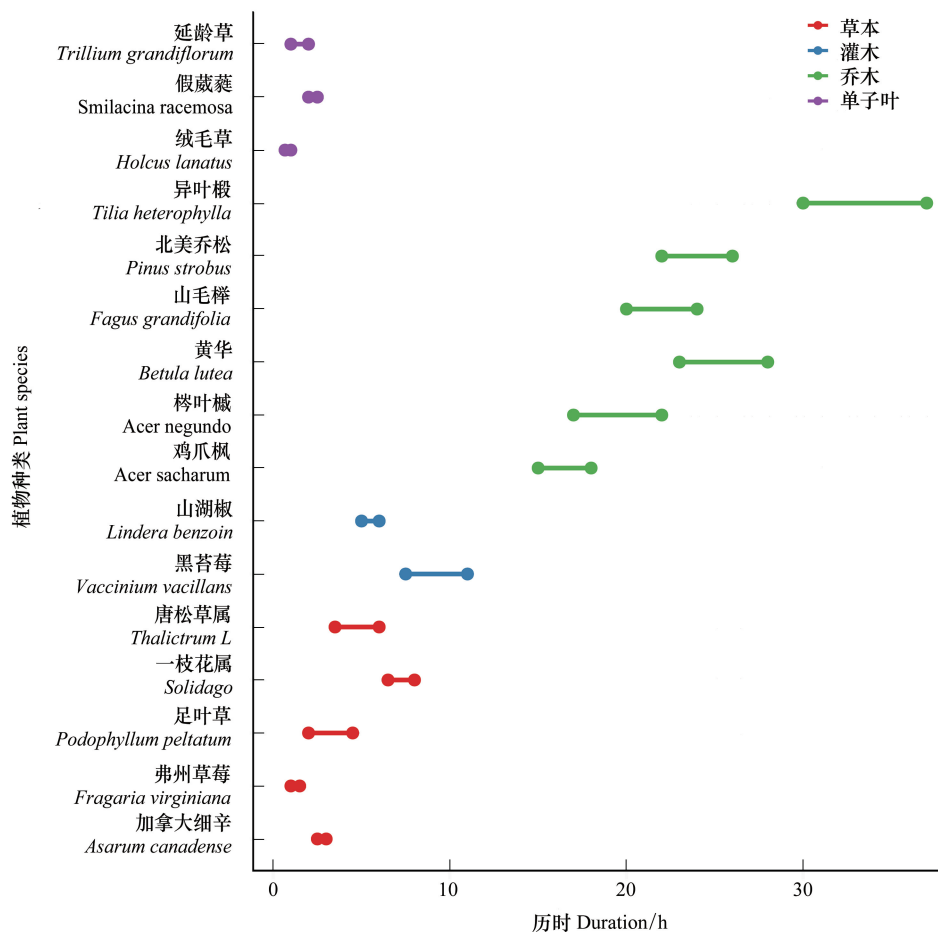


图3 某种水源的标记同位素出现在植物木质部水分中的历时(即水源补给滞后性)

Fig.3 The duration that the marked isotopes of a water source occurred in the xylem water of a plant

数据来源于文献[17], 研究区位于美国纽约州伊萨卡岛(Ithaca, New York, USA, 42°26'N, 76°30'E)

2.2 水源氢氧同位素的动态变化

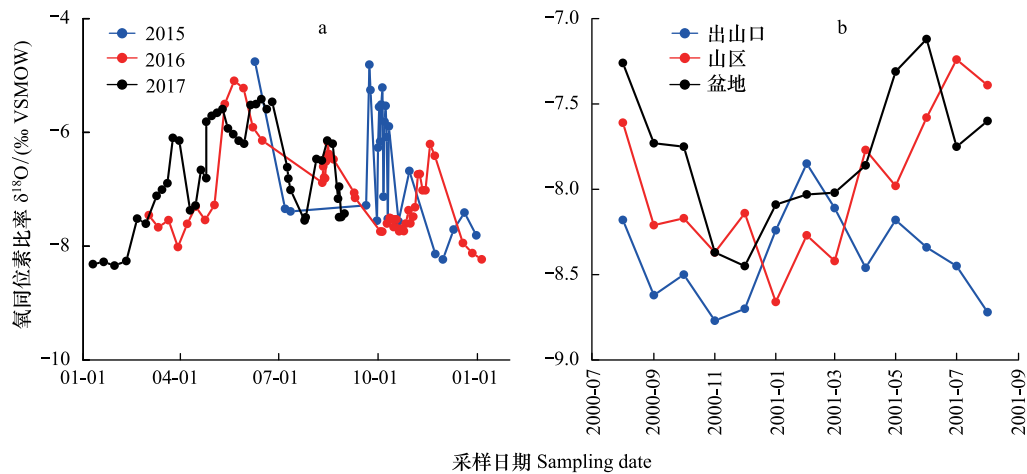
2.2.1 水源氢氧同位素的季节性变化

通常研究植物水分来源时,以同步采集的潜在水源同位素值作为水源同位素值进行定量计算,有时也采用时段平均值作为水源的同位素代表值^[9,16,21-23]。但事实上,各潜在水源因来源和季节因素的影响等,存在动态变化^[16,24]。如在我国西北地区的黑河流域,主要由降水补给的河水,其氢氧同位素比率会有显著的季节性特征,表现为夏季偏富集,冬季偏贫化的特点^[25];但当河水来源于上游的地下水、冰雪融水等时,河水的氢氧同位素比率又表现为另一种规律,如来自于冰雪融水的河水同位素偏贫化,来自于上游地下水出流的河水同位素偏富集等(图4)。地下水同位素也存在一定的动态变化,地下水补给源的不同会导致其氢氧同位素值变化,尤其是越流补给水量较大,可能导致地下水同位素波动较大^[26]。

因此在定量植物水分来源时,不能盲目以同步水源同位素值或时段平均值带入模型计算,而要通过大量连续采集水源样品测试同位素,分析其水源的同位素比率变化规律。

2.2.2 混合作用对水源氢氧同位素的影响

自然界水循环过程中的分馏和混合作用导致河水、降水、地下水等具有不同的氢氧同位素比率,这为从水源混合体中区分出各水源贡献率提供了前提条件^[3]。而河岸带河水和地下水的交互作用频繁,可能导致河水、地下水的氢氧同位素比率呈现不同的动态变化特征。例如在我国西北干旱区黑河下游的额济纳三角洲河岸带地区(图5),河水、地下水的氢氧同位素比率非常接近,导致在定量河岸带植物水分来源时,并无法从植

图4 水源 $\delta^{18}\text{O}$ 动态变化Fig.4 The dynamics of $\delta^{18}\text{O}$ of the water sources

(a) 黑河下游额济纳三角洲(99°30'—102°00'E, 40°20'—42°30'N)河水, 数据来源于文献[26]; (b) 黑河流域(98°—101°30'E, 38°—42°N)不同来源的河水, 数据来源于文献[25]; VSMOW: 维也纳标准平均海水(Vienna Standard Mean Ocean Water)

物木质部水分这一水源混合体中区分出河水和地下水的贡献率^[26]。而位于湿润区的太湖沿岸(图6), 地下水保持相对稳定的状态, 而河水可能因其来源不同导致同位素值发生季节性变化。

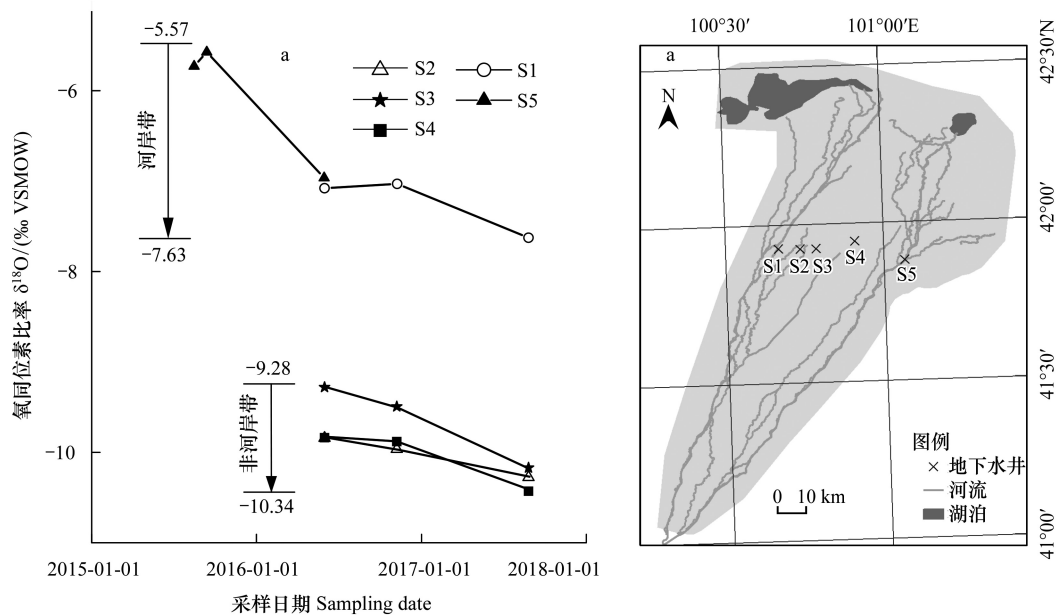


图5 黑河下游的额济纳三角洲河水、地下水氧同位素比率

Fig.5 The $\delta^{18}\text{O}$ of the river water and ground water in the Ejina Delta in the lower reaches of Heihe River

(a) 我国西北干旱区黑河下游额济纳三角洲(多年平均降水量为36mm, 多年平均入境地表径流量为5.50亿 m^3) 河岸带(99°30'—102°00'E, 40°20'—42°30'N) 河水、地下水 $\delta^{18}\text{O}$, 根据文献[26]修改; (b) 研究区地理位置及样点分布; S1—S5(样点1—5)

2.2.3 蒸发作用对水源氢氧同位素的影响

在干旱区, 特别是极端干旱区, 浅根系植物主要吸收利用降水补给的浅层土壤水。而降水补给土壤水后, 水分的氢氧同位素比率在强烈的蒸发作用下发生显著富集, 使得降水、植物木质部水分的氢氧同位素比率出现不一致(图7), 导致无法追溯浅根系植物的潜在水分来源; 特别是在极端干旱区, 有时浅层土壤含水量较低, 无法获取有效的水分进行同位素测试, 因而有时无法获得土壤水的氢氧同位素比率, 这更加大了追溯植物

潜在水分来源的难度。

3 讨论与结论

稳定氢氧同位素技术被广泛运用于植物水分来源的研究,其理论假设为“植物水分被根系吸收并向木质部运输过程中不发生氢氧同位素分馏”。生态系统中不同水源的氢氧同位素组成差异为从水源混合体中区分出各水源的贡献率提供了前提条件,但在实际应用过程中,存在诸多挑战,导致利用稳定氢氧同位素技术定量植物水分来源的结果具有较大的不确定性。

目前利用稳定氢氧同位素定量植物水分来源存在的主要挑战主要包括植物吸收水分的滞后性和水源的同位素动态变化导致定量结果的不确定性,而氢氧同位素比率的动态变化包括水源氢氧同位素比率的季节性变化、混合作用对水源同位素的影响、以及蒸发作用对水源同位素的影响等。植物吸收水分的滞后性在不同种植物间存在较大的差别,在研究植物水分来源的动态变化时,采样周期的设定要考虑到植物吸水的滞后性,即采样周期不能短于水源同位素出现在植物木质部水分内的时间;水源同位素的季节性变化可以通过连续采样或在线监测,获取完整的水源同位素变化规律,为定量植物水分来源提供依据;水源的混合作用在河岸带地区较为强烈,导致地下水与河水的同位素较为接近,无法通过稳定氢氧同位素技术定量植物的水分来源,需要寻求新的手段,如引入氢氧同位素之外的其他同位素、DNA 标记等手段实现植物水分来源定量;蒸发作用导致植物木质部水分同位素与潜在水源同位素组成存在显著差异,而无法追溯潜在水源贡献率,需寻求新的技术来定量植物水分来源。

参考文献 (References):

- [1] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(9): 1073-1082.
- [2] Meinzer F C, Clearwater M J, Goldstein G. Water transport in trees: current perspectives, new insights and some controversies. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45(3): 239-262.
- [3] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 1991, 350(6316): 335-337.
- [4] Donovan L A, Ehleringer J R. Water stress and use of summer precipitation in a great basin shrub community. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 289-297.
- [5] Flanagan L B, Ehleringer J R, Marshall J D. Differential uptake of summer precipitation among co - occurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(7): 831-836.
- [6] McCole A A, Stern L A. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water. *Journal of Hydrology*, 2007, 342(3/4): 238-248.
- [7] Schachtschneider K, February E C. The relationship between fog, floods, groundwater and tree growth along the lower Kuiseb River in the hyperarid

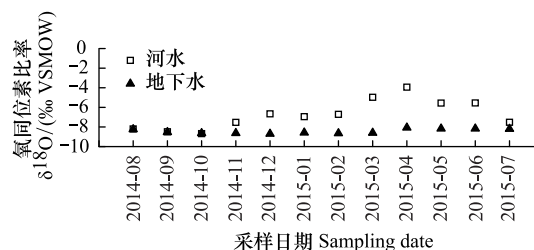


图 6 太湖流域西侧殷村港河氧同位素比率

Fig. 6 The $\delta^{18}\text{O}$ of the river water and groundwater in the Yincungang River

我国亚热带湿润季风区长江三角洲太湖流域西侧殷村港河(多年平均降水量 1100—1400mm,多年平均径流量 22.99 亿 m^3)的河岸带($31^{\circ}27'22''\text{N}$, $120^{\circ}00'18''\text{E}$)河水、地下水 $\delta^{18}\text{O}$, 根据文献[16]修改

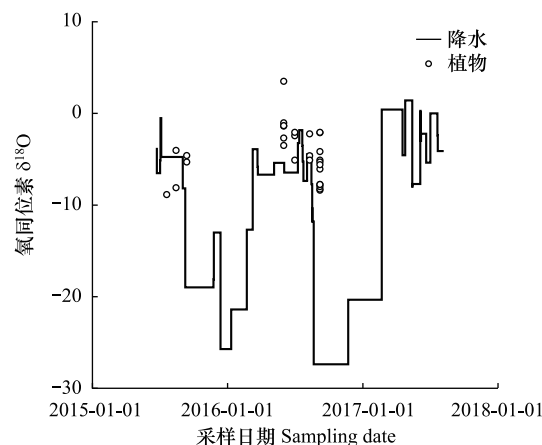


图 7 降水与浅根系植物苦豆子 (*Sophora alopecuroides*) 木质部水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对比

Fig. 7 The comparison of the $\delta^{18}\text{O}$ from precipitation and the xylem water of shallow-rooted *Sophora alopecuroides*

研究区位于中国西北干旱区黑河下游额济纳三角洲 ($99^{\circ}30'—102^{\circ}00'\text{E}$, $40^{\circ}20'—42^{\circ}30'\text{N}$)

- Namib. Journal of Arid Environments, 2010, 74(12): 1632-1637.
- [8] 巩国丽, 陈辉, 段德玉. 利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较. 生态学报, 2011, 31(24): 7533-7541.
- [9] 邢星, 陈辉, 朱建佳, 陈同同. 柴达木盆地诺木洪地区 5 种优势荒漠植物水分来源. 生态学报, 2014, 34(21): 6277-6286.
- [10] 尹力, 赵良菊, 阮云峰, 肖洪浪, 程国栋, 周茅先, 王芳, 李彩芝. 黑河下游典型生态系统水分补给源及优势植物水分来源研究. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1478-1486.
- [11] Brunel J P, Walker G R, Walker C D, Dighton J C, Kennett-Smith A. Using stable isotopes of water to trace plant water uptake//International Atomic Energy Agency, ed. Stable Isotopes in Plant Nutrition, Soil Fertility and Environmental Studies. Vienne: AIEA, 1991: 543-551.
- [12] Ehleringer J R, Phillips S L, Schuster W S F, Sandquist D R. Differential utilization of summer rains by desert plants. Oecologia, 1991, 88(3): 430-434.
- [13] White J W C, Cook E R, Lawrence J R, Broecker W S. The DH ratios of sap in trees: implications for water sources and tree ring DH ratios. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49(1): 237-246.
- [14] Rothfuss Y, Javaux M. Reviews and syntheses: isotopic approaches to quantify root water uptake: a review and comparison of methods. Biogeosciences, 2017, 14(8): 2199-2224.
- [15] Phillips D L, Gregg J W. Uncertainty in source partitioning using stable isotopes. Oecologia, 2001, 127(2): 171-179.
- [16] Qian J, Zheng H, Wang P F, Liao X L, Wang C, Hou J, Ao Y H, Shen M M, Liu J J, Li K. Assessing the ecohydrological separation hypothesis and seasonal variations in water use by *Ginkgo biloba* L. in a subtropical riparian area. Journal of Hydrology, 2017, 553: 486-500.
- [17] Dawson T E. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. Oecologia, 1993, 95(4): 565-574.
- [18] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.
- [19] Moore J W, Semmens B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. Ecology Letters, 2008, 11(5): 470-480.
- [20] Yang B, Wen X F, Sun X M. Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201: 218-228.
- [21] Wang J, Fu B J, Lu N, Zhang L. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2017, 609: 27-37.
- [22] 钱龙娇. 基于氢氧稳定同位素浑善达克沙地人工种植杨树吸水来源和耗水耦合研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [23] 王玉阳, 陈亚鹏, 李卫红, 王日照, 周莹莹, 张建鹏. 塔里木河下游典型荒漠河岸植物水分来源. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1150-1157.
- [24] Wu Y, Zhou H, Zheng X J, Li Y, Tang L S. Seasonal changes in the water use strategies of three co-occurring desert shrubs. Hydrological Processes, 2014, 28(26): 6265-6275.
- [25] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域不同水体中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化. 水科学进展, 2007, 18(6): 864-870.
- [26] 李亚飞, 于静洁, 陆凯, 王平, 张一驰, 杜朝阳. 额济纳三角洲胡杨和多枝怪柳水分来源解析. 植物生态学报, 2017, 41(5): 519-528.