

亚热带湿润区樟树吸水的土层来源及研究方法对比

王锐¹, 章新平^{1,2}, 戴军杰¹, 罗紫东¹, 贺新光^{1,2}, 关华德³

(1.湖南师范大学资源与环境科学学院,长沙 410081; 2.湖南师范大学地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室,长沙 410081; 3.National Centre for Groundwater Research and Training, Flinders University, Adelaide, SA 5001)

摘要:以长沙地区针阔混交林内的樟树为对象,基于2017年3月至2019年9月降水、土壤水和樟树茎秆水稳定同位素观测数据,利用直接比较法、水线法($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的线性关系)、Iso-Source模型和MixSIR模型,分析了樟树吸收水分的土层来源的季节变化,并比较4种方法的优缺点,旨在为植物水分利用来源研究提供新思路。结果表明:在判别樟树吸收水分的土层来源中,4种方法的判别结果基本一致。观测期内,樟树吸水层位存在明显季节变化。在2017年3—6月、2017年10月至2018年6月、2018年10月至2019年6月的湿润期,樟树分别主要利用0—20,0—40,0—20 cm土层的土壤水。在2017年、2018年、2019年的干旱期(7—9月),樟树分别主要利用20—60,0—60,60—100 cm土层的土壤水。在各层土壤水稳定同位素组成不存在明显差异时,水线法可很好地揭示樟树吸收水分的土层来源,而其他方法均无法判别樟树吸水层位。Iso-Source模型分别基于 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 计算得到的樟树主要吸水层位及其利用比例均存在一定差异,相比之下,MixSIR模型分别根据 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 计算得到的樟树主要吸水层位基本一致,且利用比例较接近。综上,在植物水分利用来源的定性判别中,适宜将直接比较法和水线法相结合进行分析;而在植物水分利用来源的定量研究中,MixSIR模型较Iso-Source模型更优。

关键词:水稳定同位素;水分利用;直接比较法;水线法;Iso-Source模型;MixSIR模型

中图分类号:S175 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)05-0267-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2020.05.037

Study on Water Uptake Layers of the *Cinnamomum camphora* and Comparison of the Methods of Water Uptake in Subtropical Humid Region

WANG Rui¹, ZHANG Xinping^{1,2}, DAI Junjie¹, LUO Zidong¹, HE Xinguang^{1,2}, GUAN Huade³

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081;

2.Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Changsha 410081;

3.National Centre for Groundwater Research and Training, Flinders University, Adelaide, SA 5001)

Abstract: The typical plant species *Cinnamomum camphora* in the Needle-broad leaf mixed forest in Changsha was used as research object. Based on the stable isotopic composition of precipitation, bulk soil water, and twig xylem water from March 2017 to September 2019, the seasonal variations of water uptake layers of *C. camphora* was analyzed by the graphical inference, water-line inference, Iso-Source model and MixSIR model. In addition, the advantages and disadvantages of four methods in determining plant water use are compared, in order to provide new perspectives for the following analysis of plant water use. The results show that: four methods of determining the water uptake layers of *C. camphora* are basically identical. Pronounced seasonal variation of water use of *C. camphora* is observed during the observation period. During the wet period consisting of March to June 2017, October 2017 to June 2018 and October 2018 to June 2019, *C. camphora* mainly uses the soil water at 0—20, 0—40 and 0—20 cm depth, respectively. During the dry periods (July to September) in 2017, 2018 and 2019, *C. camphora* mostly uptakes the soil water at 20—60, 0—60 and 60—100 cm depth, respectively. If there is no obvious difference of the stable isotopic composition of soil water at each depth, the water-line inference could determine the water uptake layers of *C. camphora* other than others. The main water uptake layers and utilization ratios of *C. camphora* calculated by Iso-

收稿日期:2020-03-12

资助项目:国家自然科学基金项目(41571021);湖南省人影办自立项科研项目(201901)

第一作者:王锐(1995—),男,硕士研究生,主要从事植被与生态水文研究。E-mail:2869299935@qq.com

通信作者:章新平(1956—),男,教授,博士,博导,主要从事气候变化与水文同位素研究。E-mail:zxp@hunnu.edu.cn

Source model based on different isotopic composition are both different, however, calculated by the MixSIR model based on different isotopic composition are both largely identical. In conclusion, it is appropriate to combine graphical inference and water-line inference in the qualitative analysis of plant water use, and Mix-SIR model is more reliable than Iso-Source model in the quantitative research of plant water use.

Keywords: water stable isotope; water utilization; graphical inference; water-line inference; Iso-Source Model; MixSIR Model

通过研究植物水分利用来源,对理解区域森林水文过程具有重要意义^[1]。研究植物水分利用来源的方法很多,早期是通过挖掘植物根系、观测土壤含水量变化以及根据植物液流特征等传统方法进行植物水分利用来源分析^[2],但这些传统方法不仅严重破坏了植物生境,且无法准确揭示植物水分利用来源和进行植物水分利用的定量分析^[3]。近年来,随着稳定同位素技术日趋成熟,稳定同位素示踪方法常被运用于植物水分利用来源研究中^[4]。寿文凯等^[5]认为,能否运用稳定同位素示踪技术研究植被水分利用来源取决于 2 个重要前提:(1)根系吸收的水分在到达未栓化树枝之前不发生稳定同位素分馏;(2)植物的各潜在水源中稳定同位素组成存在差异。已有研究^[6]发现,除少数盐生植物外,植物根系吸收的水分在植物内部运输过程中不发生稳定同位素的分馏,植物木质部水中稳定同位素组成是各潜在水源中稳定同位素的混合。因此,当植物各潜在水源中稳定同位素组成存在差异时,通过比较植物茎杆水和各潜在水源中的稳定同位素组成可直接判别植物水分利用来源^[7]。

基于稳定同位素技术并结合相关数学模型的计算为定量分析植物水分利用提供了可能,三源线性混合模型仅在水源不超过 3 个的条件下计算植物对各水源的利用比例,而 Iso-Source 模型和 MixSIR 模型均可以同时计算多个水源对植物水分利用的贡献率^[8-9]。尽管各模型均可计算植物对各水源的利用比例,但由于计算方法差异及输入数据的不确定性(如潜在水源的稳定同位素组成及其分馏特征、水源的数量等)可能导致各模型计算结果出现一定偏差^[10-11]。与此同时,由于各水源中²H 和¹⁸O 的分馏速率不同,分别基于 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的植物水分利用来源判别也存在一定差异^[12-13]。相关学者通过分析不同水体中水线特征,即 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 线性关系,进一步研究了区域水环境特征^[14]、土壤水分时空变化特征^[15]以及生态水文分离现象^[16]等生态水文学热点问题。然而,利用水线方法判别植物水分利用来源的研究较少。当前我国关于植物水分利用来源的研究主要集中在干旱半干旱地区^[10-11,17]和喀斯特地区^[18],而对非喀斯特湿润地区植物水分利用来源的研究较少。且已有研究主要是关于植物水分利用特征的分析,而

对植物水分利用来源判别方法的比较研究较少。

本研究以亚热带湿润地区的长沙作为研究区域,以针阔混交林内优势种樟树(*Cinnamomum camphora*)作为研究对象,基于 2017 年 3 月至 2019 年 9 月期间的环境因子、降水、土壤水和樟树茎杆水稳定同位素观测数据,利用直接比较法、水线法、Iso-Source 模型及 MixSIR 模型研究了不同水分条件下樟树水分利用深度。探究不同水分条件下樟树吸收水分的土层来源;比较 4 种方法的判别结果,明确 4 种方法在植物水分利用来源研究中的优缺点及其适用范围。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究场地位于湖南省长沙市望城区八曲河村(28°22′09″N—112°45′43″E),平均海拔在 50 m 左右。研究区受亚热带季风的影响,气候四季分明,雨热同期。多年平均降水量 1 415 mm,年内降水存在明显季节差异,在 3—7 月初,受夏季风影响,降水丰富;7 月中旬—9 月,在副热带高压控制下,伏旱严重。多年平均气温 17.4 °C,多年平均年积温(≥ 0 °C)5 457 °C,全年无霜期约 272 天,植物生长期在 330 天左右。研究场地的地下水深达 18 m,由于人工栽植树木根系主要分布在 1 m 以内,因此难以利用地下水。土壤以红色的粉砂质黏壤土为主。研究林分是以 15 年生常绿阔叶乔木樟树(*Cinnamomum camphora*)为优势种,刺杉(*Cunninghamia lanceolate*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等常绿针叶乔木为伴生种的人工混交林。观测发现,虽为常绿混交林,但生长季初期伴随新叶生长出现大量枯叶掉落,地表常年枯落物堆积厚度可达 5 cm。

1.2 样品采集

于 2017 年 3 月至 2019 年 9 月采集植物和土壤样品。为避免降水干扰,样品采集一般在降水后 3~10 天进行,采样频率为每月 1~3 次,共 69 次。采集植物样品时,选择 3 棵长势良好的樟树作为固定样树,用于长期连续取样。取样时,剪取冠层下部已木质化的小枝(直径 0.3~0.5 cm,长 4~6 cm),迅速去皮后装入 10 mL 玻璃瓶内,并用 Parafilm 封口膜密封、编号、冷冻保存,待测定其水稳定同位素比率。在

样树附近利用手持式土壤取样钻机(科力SD-1,北京吉奥科技有限公司)钻取土壤样品,每次钻取2个平行土样。钻孔深度100 cm,0—20 cm取样间隔为5 cm,20 cm以下取样间隔为10 cm。采集的土壤样品密封于10 mL的玻璃瓶中用于测定土壤水中稳定同位素比率。

降水取样分别在降水日(降水量 ≥ 0.1 mm)的8:00和20:00进行。将采集的降水样直接装入30 mL的聚乙烯样品瓶内,密封、编号且低温保存,待测定其稳定同位素比率。参照气象部门的规范,将当日20:00(代表当日8:00—20:00的累积降水量)和次日8:00(代表当日20:00至翌日8:00的累积降水量)收集的降水量之和记为当日的降水量,相应时段的降水水中稳定同位素值也记为当日^[19]。

土壤体积含水量采用布设在样地中心位置的云智能管式土壤水分温度监测仪(RWET-100,智埭,中国)测定。仪器探头位于0—100 cm每隔10 cm处,监测精度为 $\pm 2.5\%$,监测时间自2017年2月起,采集频率为60 min/次。土壤含水量监测数据利用烘干称重法进行水分校正。

采用内径4 cm、长150 cm的土钻采集樟树根系。采集地点距离樟树主干0.5 m,逆时针方向上每30°钻取1个土样,以减少空间异质性对采集结果的影响。取样深度为100 cm,按每10 cm深度共采集10层,将采集根系分层挑选装入密封袋,编号,待室内处理。室内处理时,用0.2 mm筛子冲洗,挑出杂物并检出全部细根(直径 ≤ 2 mm)和粗根(直径 ≥ 2 mm),装入纸袋,在105 °C下烘干24 h至恒重,天平称量后录入数据以备分析。

1.3 样品处理与测试

利用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2100,北京理加联合有限公司)从土壤、植物样品中抽提出土壤水和植物茎杆水。所有水样的氢、氧稳定同位素比率均利用气-液两用型水稳定同位素分析仪(DLT-IWA-35EP,美国Los Gatos Research公司)测定。被测试水样中的稳定同位素丰度用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)稳定同位素比率的千分差值(‰)表示:

$$\delta_{\text{sample}} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中: R_{sample} 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别代表水样和标准平均海洋水中稳定同位素比率($^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)。 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试精度,分别为 $\pm 0.6\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。

由于植物茎杆水在抽提过程中存留有机物,而有机物中的甲醇和乙醇会引起光谱干扰并造成被测定的植物茎杆水中稳定同位素值出现偏差,因此需对水

样中的醇类污染进行稳定同位素比率的校正^[20]。由于所选植物茎杆水中仅发现甲醇类污染,所以通过试验建立的甲醇类污染误差校正公式为:

$$\Delta\delta^2\text{H} = 0.38(\ln NB)^2 - 1.05\ln NB + 2.26 \quad (2)$$

$$\Delta\delta^{18}\text{O} = 0.21(\ln NB)^2 - 0.45\ln NB + 0.98 \quad (3)$$

式中: $\Delta\delta^2\text{H}$ 和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 分别代表由甲醇类污染导致的稳定同位素值误差; NB 为窄带系数且随植物类型而变化,该参数主要反映水样中甲醇的污染程度,由LGR公司的稳定同位素分析处理软件提供。校正后的稳定同位素值为实测值减去误差值^[20]。

1.4 模型简介

1.4.1 Iso-Source模型 Iso-Source模型基于水稳定同位素平衡和水量平衡原理,假设所有水源对植物水分利用的贡献率之和为100%。将植物茎杆水和各水源中稳定同位素值代入Iso-Source模型,通过计算各水源中稳定同位素组成在植物茎杆水的稳定同位素组成中所占比例,从而得到各水源对植物水分利用的贡献率^[8]。在模型运行时,将来源增量(Increment)参数设置为1%,容差(Tolerance)设置为0.01,以提高模型计算结果的准确度^[10]。模型计算原理可用公式表示为:

$$\delta X = \sum_{i=1}^n f_i \delta X_i \quad (4)$$

$$1 = \sum_{i=1}^n f_i \quad (5)$$

式中: δX 为植物茎杆水中的 $\delta^2\text{H}$ (或 $\delta^{18}\text{O}$); i 为第 i 个水源; n 为水源总数; δX_i 为第 i 个水源中的 $\delta^2\text{H}$ (或 $\delta^{18}\text{O}$); f_i 为植物对第 i 个水源的利用比例。

1.4.2 MixSIR模型 MixSIR模型是Moore等^[9]基于贝叶斯模型原理提出来的用于计算各源对混合物的贡献比率的数学模型,之后被应用于生态水文领域中植物水分利用来源的定量模拟。该模型在多源线性混合模型基础上,充分考虑植物茎杆水和各潜在水源中稳定同位素组成的空间异质性^[11],将植物茎杆水和各潜在水源中稳定同位素的平均值以及标准差带入模型计算。模型运行时,将分馏系数设定为0,表示植物在吸水过程中不发生稳定同位素分馏。迭代次数不少于50 000次,若各水源的贡献率均收敛,且后验密度 < 0.01 ,表明模型计算有效。若不收敛且后验密度不小于0.01时,则需继续增加运行的迭代次数^[11,21]。模型计算原理可用公式表示为:

$$\delta X + B = \sum_{i=1}^n f_i (\delta X_i + C_i) \quad (6)$$

$$1 = \sum_{i=1}^n f_i \quad (7)$$

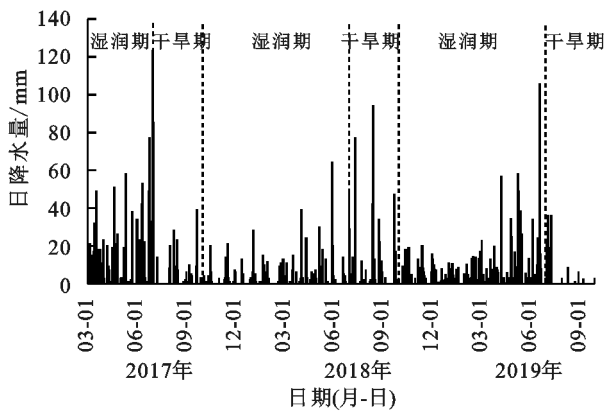
式中: δX 为植物茎杆水中的 $\delta^2\text{H}$ (或 $\delta^{18}\text{O}$); B 为植物茎杆水中 $\delta^2\text{H}$ (或 $\delta^{18}\text{O}$)的标准差; i 为第 i 个水源; n 为水源总数; δX_i 为第 i 个水源中的 $\delta^2\text{H}$ (或 $\delta^{18}\text{O}$); C_i 为第 i 个水源中 $\delta^2\text{H}$ (或 $\delta^{18}\text{O}$)的标准差; f_i 为植物对第 i 个水源的利用比例。

在模型计算时,根据不同深度土壤含水量和土壤中稳定同位素组成的特点,将土壤含水量和稳定同位素值相近的相邻土层合并为同一水源,因此将 0—100 cm 土壤分为 0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—100 cm 5 个层次,并将樟树茎杆水和 5 层土壤水(水源)中稳定同位素值分别带入上述 2 个模型中进行计算。

2 结果与分析

2.1 降水量与土壤含水量的变化

由图 1 可知,2017 年 3 月至 2019 年 9 月观测期间降水量分布存在明显的季节差异。在 2017 年、2018 年、2019 年的雨季(3—6 月)降水日数分别为 64, 38, 56 天,累积降水量分别为 1 095.0, 366.0, 758.9 mm。在各年旱季(7—9 月)降水日数分别为 21, 27, 10 天,累积降水量分别为 287.0, 515.0, 157.8 mm。此外,在 2017 年 10 月至 2018 年 2 月,总降水日数为 52 天,累积降水量为 290.9 mm;2018 年 10 月至 2019 年 2 月期间,总降水日数达 83 天,累积降水量为 473.2 mm,较上年同期降水量增加 62.7%。



在整个观测期间,土壤含水量在 20.9%~39.9% 的范围内变化,并随土层深度增加呈递增趋势。受降水和蒸发影响,土壤含水量的变幅在表层 0—10 cm 最大,并随土层深度增加而逐渐减小。此外,表层 0—10 cm 土壤含水量的高值出现在 2017 年 3—6 月和 2018 年 10 月至 2019 年 6 月,平均值分别为 34.4% 和 35.3%,这主要与 2 时期偏多的降水有关。在 2017 年 10 月至 2018 年 6 月,由于降水较 2017 年 3—6 月和 2018 年 10 月至 2019 年 6 月偏少,表层土壤含水量也明显低于 2 时期,平均值为 30.0%。比较发现,在 2017 年、2018 年、2019 年的 7—9 月,受较少降水补给和较强蒸散发的影响,表层土壤含水量较年内其他时段明显偏低,分别只有 26.7%, 27.9%, 21.9%。其中,尤以 2019 年 7—9 月林下各层土壤含水量最低,表明该时期研究区受干旱胁迫程度较往年异常偏重。

根据上述降水量和土壤含水量的时间变化特征,将观测期分为湿润期(10 月至翌年 6 月)和干旱期(7—9 月)2 个时段,以进一步分析研究区不同水体中稳定同位素组成和樟树吸水层位的季节性变化特征。

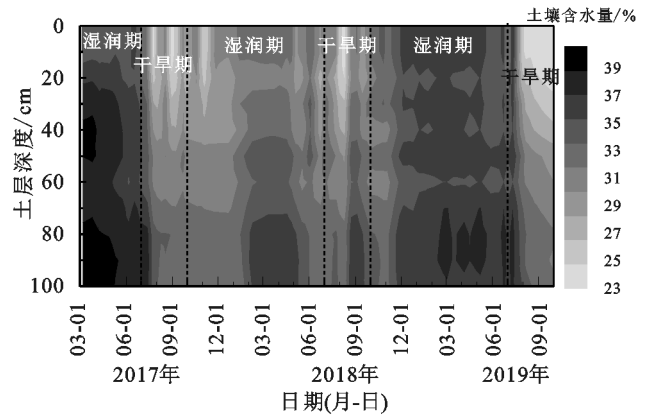


图 1 日降水量和土壤含水量随时间的变化

2.2 不同水体中稳定同位素的变化

由图 2 和表 1 可知,2017 年 3 月至 2019 年 9 月,降水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别为 $-94.97\text{‰} \sim 30.53\text{‰}$ 和 $-13.32\text{‰} \sim 2.85\text{‰}$ 。降水中稳定同位素组成存在明显季节差异。平均而言,在湿润期,降水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正,分别为 $-22.85\text{‰} \pm 24.27\text{‰}$ 和 $-5.61\text{‰} \pm 2.81\text{‰}$;在干旱期,降水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负,分别为 $-64.68\text{‰} \pm 16.76\text{‰}$ 和 $-9.30\text{‰} \pm 2.20\text{‰}$ 。降水中稳定同位素的季节差异主要与该地区水汽来源的季节变化有关^[22]。

观测期内土壤水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别为 $-80.41\text{‰} \sim -8.32\text{‰}$ 和 $-10.58\text{‰} \sim -2.52\text{‰}$ 。受降水和蒸发的直接影响,土壤水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变幅在 0—10 cm 最大,并随土层深度增加逐渐减小。受降水补给影响,土壤水中稳定同位素组成存在明显季节差异,但季节差异随土层深度增加逐渐减小。在

湿润期,表层 0—10 cm 土壤水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正,分别为 $-36.53\text{‰} \pm 18.17\text{‰}$ 和 $-5.71\text{‰} \pm 2.15\text{‰}$ 。随土层深度增加,土壤水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐偏负。在时间变化上,干旱期表层 0—10 cm 土壤水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 较湿润期的比率值明显偏负,分别为 $-67.31\text{‰} \pm 9.92\text{‰}$ 和 $-8.49\text{‰} \pm 1.68\text{‰}$ 。随土层深度增加,土壤水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出先偏负后偏正的趋势。

樟树茎杆水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别在 $-68.91\text{‰} \sim -21.29\text{‰}$ 和 $-9.04\text{‰} \sim -3.72\text{‰}$ 的范围内变化。与降水和土壤水中稳定同位素变化相似,樟树茎杆水中稳定同位素组成也表现出明显季节变化。在湿润期,樟树茎杆水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 整体偏正,分别为 $-42.39\text{‰} \pm 12.84\text{‰}$ 和 $-6.04\text{‰} \pm 1.49\text{‰}$ 。在干旱期,樟树茎杆水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 较湿润期偏负,分别为 $-51.55\text{‰} \pm 7.04\text{‰}$ 和 $-7.27\text{‰} \pm 0.70\text{‰}$ 。

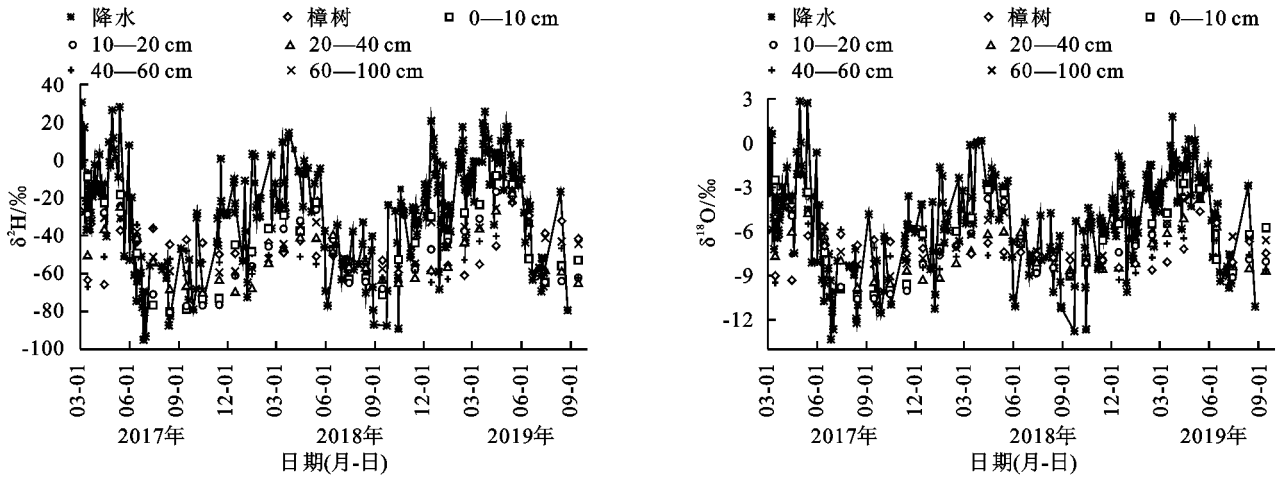


图 2 降水、樟树茎杆水和土壤中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的变化

表 1 降水、樟树茎杆水和土壤中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 统计

项目	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$				$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$			
	整个观测期		湿润期	干旱期	整个观测期		湿润期	干旱期
	最小值	最大值			最小值	最大值		
降水	-94.97	30.53	-22.73 ± 24.27	-64.68 ± 16.76	-13.32	2.85	-5.61 ± 2.81	-9.30 ± 2.20
樟树	-68.91	-21.29	-42.39 ± 12.84	-51.55 ± 7.04	-9.04	-3.72	-6.04 ± 1.49	-7.27 ± 0.70
0—10 cm	-80.26	-8.32	-36.53 ± 18.17	-67.31 ± 9.92	-10.42	-2.52	-5.71 ± 2.15	-8.49 ± 1.68
10—20 cm	-80.41	-16.79	-41.98 ± 17.34	-68.54 ± 6.40	-10.58	-3.67	-6.34 ± 1.91	-9.13 ± 0.99
20—40 cm	-70.49	-18.00	-47.94 ± 15.35	-61.19 ± 5.09	-9.87	-3.83	-7.15 ± 1.57	-8.63 ± 0.66
40—60 cm	-66.96	-15.42	-50.31 ± 12.45	-52.13 ± 8.35	-9.47	-3.80	-7.49 ± 1.29	-7.72 ± 0.89
60—100 cm	-65.81	-22.22	-49.10 ± 10.57	-44.03 ± 8.08	-9.30	-4.64	-7.40 ± 1.09	-7.24 ± 0.67

注:表中湿润期和干旱期数据为年平均值±标准差。

2.3 樟树吸水的土层来源判别

2.3.1 直接比较法判别樟树吸水的土层来源 由图 3 可知,在湿润期的 2017 年 3—4 月、2017 年 10 月至 2018 年 5 月和 2018 年 10 月至 2019 年 4 月,樟树茎杆水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别与 0—20, 0—50, 0—20 cm 土壤水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 接近。这表明樟树在 3 个湿润期分别主要利用 0—20, 0—50, 0—20 cm 的土壤水。在 2017 年和 2019 年的干旱期,樟树茎杆水中的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 分别与 30—60, 60—100 cm 土壤水

中的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 接近。上述结果表明,樟树在 2 个干旱期分别主要利用 30—60, 60—100 cm 的土壤水。

在各湿润期的 5—6 月以及在 2018 年 7—9 月的干旱期,由于大降水事件(日降水量 ≥ 25 mm)对土壤水的补给较深,土壤水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 随土层深度增加不存在明显梯度变化,即各土层中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 差异较小。因此,无法通过比较樟树茎杆水和土壤水中稳定同位素组成判别樟树吸收水分的土层来源。

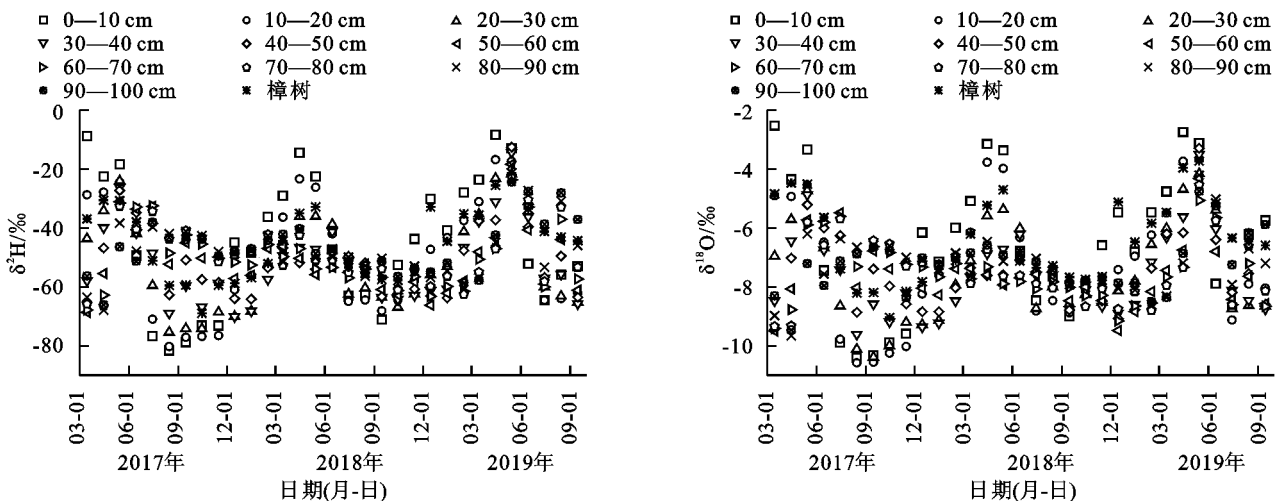


图 3 樟树茎杆水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与不同深度土壤水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的变化

2.3.2 水线法判别樟树吸水的土层来源 根据 Craig^[23]对大气水线的定义,将土壤水和植物茎杆水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的线性关系分别定义为土壤水线(SWL)和植物茎杆水线(XWL)。通过分析不同水体的水线特征有助于探究区域森林水文过程^[15]。为探究研究区不同水分条件下水线变化特征与植物水分利用来源之间的关系,分别计算了湿润期和干旱期内樟树茎杆水与各层土壤水的水线方程,并通过比较樟树 XWL 与各层 SWL 的斜率大小进一步揭示樟树吸水的土层来源。若樟树 XWL 的斜率与某层 SWL 的斜率接近,则认为樟树利用该层土壤水。

由表 2 可知,在 2017 年 3—6 月和 2018 年 10 月至 2019 年 6 月,樟树 XWL 的斜率均与 0—10,10—20 cm 的 SWL 斜率较为接近,表明樟树在这 2 个时

表 2 各湿润期樟树茎杆水线(XWL)和土壤水线(SWL)的方程

项目	2017 年 3—6 月		2017 年 10 月至 2018 年 6 月		2018 年 10 月至 2019 年 6 月	
	水线方程	<i>n</i>	水线方程	<i>n</i>	水线方程	<i>n</i>
XWL _{樟树}	$\delta^2\text{H}=6.54\delta^{18}\text{O}-1.19$	8	$\delta^2\text{H}=8.59\delta^{18}\text{O}+9.33$	21	$\delta^2\text{H}=7.88\delta^{18}\text{O}+6.82$	16
SWL _{0—10 cm}	$\delta^2\text{H}=7.42\delta^{18}\text{O}+8.90$	8	$\delta^2\text{H}=8.07\delta^{18}\text{O}+7.00$	21	$\delta^2\text{H}=8.37\delta^{18}\text{O}+14.47$	16
SWL _{10—20 cm}	$\delta^2\text{H}=6.86\delta^{18}\text{O}+6.07$	8	$\delta^2\text{H}=7.80\delta^{18}\text{O}+3.46$	21	$\delta^2\text{H}=8.43\delta^{18}\text{O}+14.53$	16
SWL _{20—40 cm}	$\delta^2\text{H}=8.47\delta^{18}\text{O}+14.91$	8	$\delta^2\text{H}=8.80\delta^{18}\text{O}+13.83$	21	$\delta^2\text{H}=9.71\delta^{18}\text{O}+20.90$	16
SWL _{40—60 cm}	$\delta^2\text{H}=9.62\delta^{18}\text{O}+22.53$	8	$\delta^2\text{H}=9.35\delta^{18}\text{O}+19.15$	21	$\delta^2\text{H}=9.67\delta^{18}\text{O}+21.45$	16
SWL _{60—100 cm}	$\delta^2\text{H}=9.52\delta^{18}\text{O}+22.68$	8	$\delta^2\text{H}=6.43\delta^{18}\text{O}-0.79$	21	$\delta^2\text{H}=9.40\delta^{18}\text{O}+21.68$	16

表 3 各干旱期樟树茎杆水线(XWL)和土壤水线(SWL)的方程

项目	2017 年 7—9 月		2018 年 7—9 月		2019 年 7—9 月	
	水线方程	<i>n</i>	水线方程	<i>n</i>	水线方程	<i>n</i>
XWL _{樟树}	$\delta^2\text{H}=7.81\delta^{18}\text{O}+4.36$	9	$\delta^2\text{H}=5.59\delta^{18}\text{O}-14.00$	7	$\delta^2\text{H}=6.46\delta^{18}\text{O}-1.29$	8
SWL _{0—10 cm}	$\delta^2\text{H}=7.03\delta^{18}\text{O}-7.26$	9	$\delta^2\text{H}=6.17\delta^{18}\text{O}-14.08$	7	$\delta^2\text{H}=3.17\delta^{18}\text{O}-35.42$	8
SWL _{10—20 cm}	$\delta^2\text{H}=8.46\delta^{18}\text{O}+10.07$	9	$\delta^2\text{H}=8.28\delta^{18}\text{O}+6.26$	7	$\delta^2\text{H}=4.49\delta^{18}\text{O}-24.67$	8
SWL _{20—40 cm}	$\delta^2\text{H}=8.57\delta^{18}\text{O}+13.47$	9	$\delta^2\text{H}=7.78\delta^{18}\text{O}+4.49$	7	$\delta^2\text{H}=9.59\delta^{18}\text{O}+21.16$	8
SWL _{40—60 cm}	$\delta^2\text{H}=8.87\delta^{18}\text{O}+15.95$	9	$\delta^2\text{H}=7.47\delta^{18}\text{O}+3.18$	7	$\delta^2\text{H}=7.88\delta^{18}\text{O}+10.52$	8
SWL _{60—100 cm}	$\delta^2\text{H}=9.80\delta^{18}\text{O}+23.55$	9	$\delta^2\text{H}=8.90\delta^{18}\text{O}+17.21$	7	$\delta^2\text{H}=5.74\delta^{18}\text{O}-0.90$	8

2.4 樟树吸水土层来源的定量分析

2.4.1 Iso—Source 模型的定量分析 根据 Iso—Source 模型计算得到的不同时期樟树对各层土壤水的平均利用比例。基于对 $\delta^2\text{H}$ 的计算(图 4a),在湿润期的 2017 年 3—4 月、2017 年 10 月至 2018 年 5 月、2018 年 10 月至 2019 年 4 月,樟树分别主要利用 0—20,0—40,0—20 cm 的土壤水,利用比例分别为 64.2%,67.0%,63.7%。与此同时,根据 $\delta^{18}\text{O}$ 的计算结果(图 4b),樟树在湿润期则分别主要利用 0—10,0—40,0—10 cm 土壤水,利用比例分别为 68.8%,65.3%,56.0%。

在干旱期,樟树吸水土层较各湿润期明显下移。基于对 $\delta^2\text{H}$ 的计算,在 2017 年和 2019 年的 7—9 月,樟树分别主要利用 20—100,60—100 cm 土壤水,利用比例分别为 69.8%和 74.6%。根据 $\delta^{18}\text{O}$ 的计算

期主要利用 0—20 cm 浅层土壤水。在 2017 年 10 月至 2018 年 6 月,樟树 XWL 的斜率与 0—10,10—20,20—40 cm 的 SWL 斜率接近,说明该时期樟树对 0—40 cm 内各层土壤水均有利用。

由表 3 可知,在 2017 年 7—9 月,樟树 XWL 的斜率与 0—10,10—20,20—40,40—60 cm 的 SWL 斜率较为接近,说明樟树在该时期主要利用 0—60 cm 的土壤水。在 2018 年 7—9 月,樟树 XWL 的斜率与 0—10,20—40,40—60 cm 的 SWL 斜率接近,说明这个时期樟树对 3 个土层的水分均有利用。而在 2019 年 7—9 月,樟树 XWL 的斜率接近于 60—100 cm 土层的 SWL 斜率,表明该时期樟树吸水层位较 2017 年和 2018 年同期明显下移,即主要吸收 60—100 cm 深层土壤水。

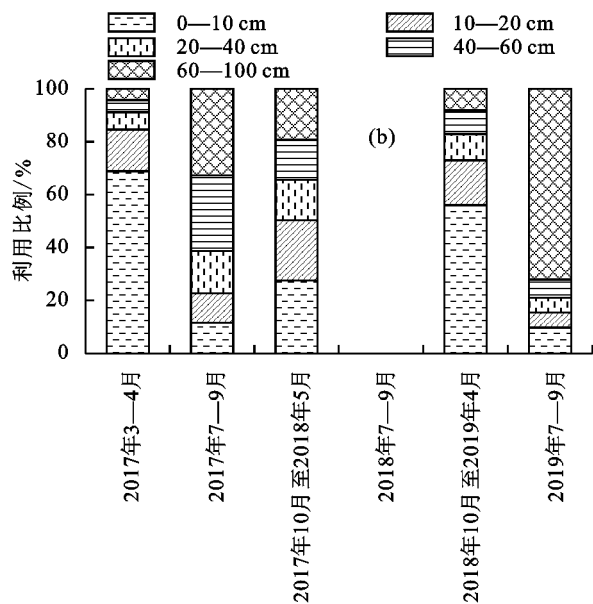
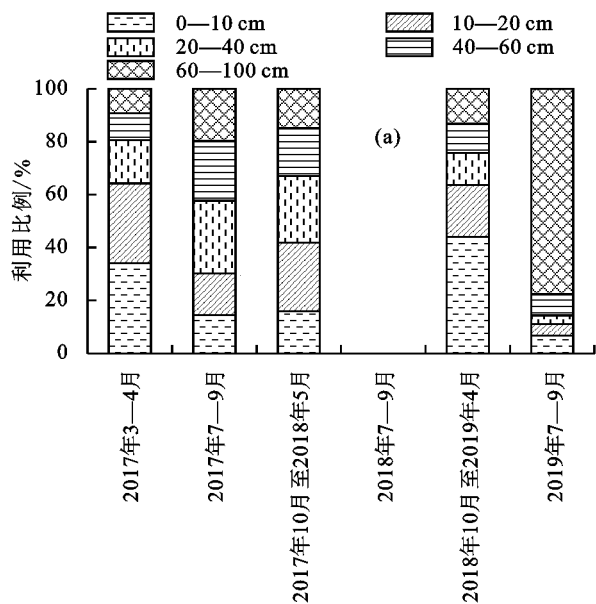
结果,在 2017 年 7—9 月,樟树对 20—100 cm 土壤水的利用比例较 $\delta^2\text{H}$ 计算的结果增加 7.5%,为 77.3%;在 2019 年 7—9 月,樟树对 60—100 cm 深层土壤水的利用比例与 $\delta^2\text{H}$ 计算的结果接近,为 72.1%。

此外,在各湿润期的 5—6 月以及在 2018 年 7—9 月的干旱期,由于林下各土层土壤水中稳定同位素组成随深度增加不存在明显的梯度变化,利用 Iso—Source 模型或其他相关数学模型计算得到的结果均无法准确反映樟树对各层土壤水的利用比例。

2.4.2 MixSIR 模型的定量分析 基于 MixSIR 模型计算得到的研究区樟树在不同时期对各层土壤水的平均利用比例(图 5)。通过比较发现,MixSIR 模型的计算结果与 Iso—Source 模型的计算结果基本一致。基于对 $\delta^2\text{H}$ 的计算(图 5a),樟树在湿润期的 2017 年 3—4 月、

2017 年 10 月至 2018 年 5 月、2018 年 10 月至 2019 年 4 月分别对 0—20,0—40,0—20 cm 的土壤水利用比例最大,分别为 69.2%,62.4%,54.7%。根据 $\delta^{18}\text{O}$ 的计算结

果(图 5b),樟树在 3 个湿润期分别主要利用 0—20,0—40,0—20 cm 土壤水,其利用比例与 $\delta^2\text{H}$ 计算结果接近,分别为 67.1%,62.9%,60.0%。



注:(a)为基于 $\delta^2\text{H}$ 的计算结果;(b)为基于 $\delta^{18}\text{O}$ 的计算结果。下同。

图 4 基于 Iso-Source 模型计算的不同时期樟树对各层土壤水的利用比例

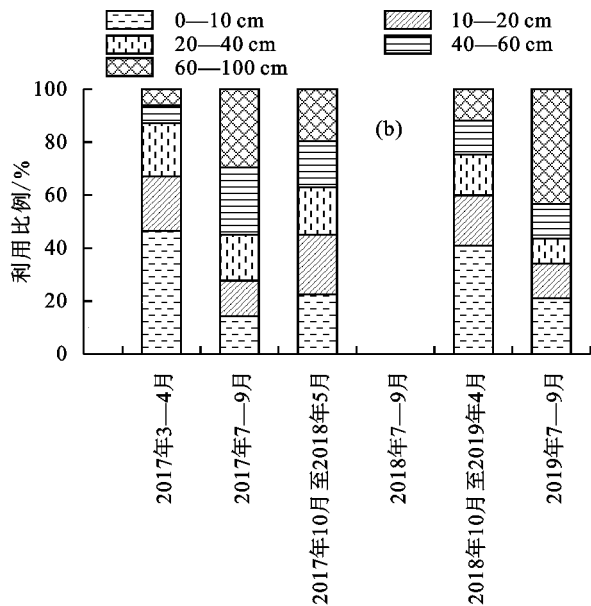
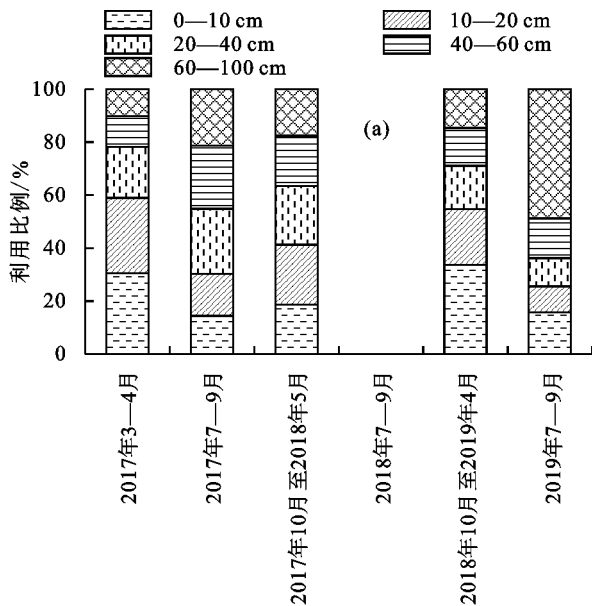


图 5 基于 MixSIR 模型计算的不同时期樟树对各层土壤水的利用比例

在 2017 年和 2019 年的干旱期(7—9 月),根据对 $\delta^2\text{H}$ 的计算结果,樟树分别主要利用 20—100,60—100 cm 的土壤水,利用比例分别为 69.8% 和 48.8%。基于对 $\delta^{18}\text{O}$ 的计算,樟树在两干旱期分别对 20—100,60—100 cm 土壤水的利用比例与 $\delta^2\text{H}$ 的计算结果接近,分别为 72.2% 和 43.4%。

通过比较基于 2 类稳定同位素的模型计算结果发现,MixSIR 模型计算得到的樟树主要吸水层位基本一致,且樟树对主要吸水层位的利用比例较为接近。相较于 MixSIR 模型,Iso-Source 模型根据 2 类稳定同位素计算得到的樟树主要吸水层位存在一定偏差,且在多个时期樟树对主要吸水层位的利用比

例差异较大。

3 讨论

3.1 判别樟树吸水土层的方法比较

相关研究^[3,11]发现,不同方法和模型在判别植物水分利用来源过程中存在不同程度的偏差。通过分析直接比较法、水线法、Iso-Source 模型和 MixSIR 模型的判别结果发现,4 种方法对樟树吸水层位季节性变化的判别结果基本一致。比较发现,4 种方法在判别樟树吸收水分的土层来源中均存在一定优势和不足。

在各湿润期的当年 10 月至翌年 4 月以及各干旱期的 7—9 月(除 2018 年 7—9 月),由于土壤中稳

定同位素组成随土层深度增加存在明显梯度变化,通过比较樟树茎秆水和各层土壤水中稳定同位素组成可迅速而准确地判别樟树吸水层位^[6-7]。而在各湿润期的 5—6 月及在 2018 年 7—9 月的干旱期,受大降水事件的影响,土壤水中稳定同位素组成随深度增加不存在明显梯度变化,樟树茎秆水中 $\delta^2\text{H}$ (或 $\delta^{18}\text{O}$) 与土壤水中 $\delta^2\text{H}$ (或 $\delta^{18}\text{O}$) 存在重合或出现多个交点,这使得利用直接比较法无法准确判别樟树吸水深度^[3],同样也使得 Iso-Source 模型和 MixSIR 模型无法准确地计算出樟树对各层土壤水的利用比例^[21]。Yang 等^[21]和 Wang 等^[11]指出,当通过比较植物茎秆水和各潜在水源中稳定同位素组成无法判别植物水分利用来源时,需结合相关环境因子(例如降水量、土壤含水量等)的变化特征进行分析。在各湿润期的 5—6 月,累积降水量偏大,各层土壤含水量与前期 3—4 月接近,樟树吸水的土层来源可能与前期 3—4 月相似,即在 2017 年、2019 年的 5—6 月,樟树主要利用 0—20 cm 土壤水;在 2018 年 5—6 月,樟树主要利用 0—50 cm 土壤水。在 2018 年 7—9 月,由于累积降水量明显高于 2018 年 3—6 月和 2017 年 7—9 月,各层土壤含水量介于 2017 年 7—9 月和 2018 年 3—6 月各层土壤含水量之间,说明该时期樟树吸水的土层来源可能与 2018 年 3—6 月和 2017 年 7—9 月相似,即主要利用 0—60 cm 土壤水。

该研究根据不同时期环境水分状况,拟合了樟树茎秆水和各层土壤水的水线方程,并通过比较樟树 XWL 和各层 SWL 斜率的大小实现了对樟树吸水的土层来源判别,其结果与直接比较法判别结果基本一致。相较于直接比较法, Iso-Source 模型和 MixSIR 模型,水线法克服了由于各层土壤水中稳定同位素组成差异较小而无法判别植物水分利用来源的问题,揭示了樟树在各湿润期的 5—6 月以及在 2018 年 7—9 月期间的主要吸水层位。分析发现,水线法主要用于判别某一段时期内植物水分利用的平均状况。因此,该方法无法用于分析植物水分利用对典型降水或灌溉水的动态响应过程^[24]。

尽管利用直接比较法和水线法能够实现对植物水分利用的定性判别,但无法给出植物对各水源利用的定量解释,而利用 Iso-Source 模型和 MixSIR 模型可以计算出不同水分状况下樟树对各层土壤水的利用比例。比较发现,2 种模型计算得到的樟树吸水的土层来源基本一致。可以看到,由 Iso-Source 模型分别根据 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 计算得到的樟树主要吸水层位以及樟树对主要吸水层位的利用比例存在一定

程度的差异,这可能与土壤水中 ^2H 与 ^{18}O 的分馏差异有关。相关研究^[12-13]发现,在黏粒含量较高的土壤或沉积物中,氧稳定同位素值受黏粒和矿物质的影响变化较大,而氢稳定同位素则受黏粒和矿物质影响较小。该研究场地的土壤属粉砂质黏壤土^[15],较多的土壤黏粒使得 ^{18}O 在土壤水中的分馏性质发生改变。因此, Iso-Source 模型根据 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 计算得到的结果存在一定差异。类似结果在其他研究区也有发现^[21]。相较于 Iso-Source 模型, MixSIR 模型根据 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 计算得到的樟树主要吸水层位一致,且樟树对主要吸水层位的利用比例较为接近。这是由于该模型充分考虑了植物茎秆水和各层土壤水中稳定同位素组成的空间异质性,从而使得计算结果的误差小于 Iso-Source 模型的计算结果^[10,25]。

3.2 不同时期樟树吸水的土层来源

上述分析发现,研究区樟树吸水的土层来源存在明显季节变化。在湿润期的 2017 年 3—6 月和 2018 年 10 月至 2019 年 6 月,樟树主要利用 0—20 cm 浅层土壤水;而在 2017 年 10 月至 2018 年 6 月的湿润期,樟树主要利用 0—40 cm 土壤水,樟树在 3 个湿润期的吸水层位的差异主要与各时期土壤水分状况有关。在 2017 年 3—6 月和 2018 年 10 月至 2019 年 6 月,受偏多降水的影响,浅层土壤含水量较高,均大于 34.0%,植物浅层根系活性较强^[18,26],因此樟树主要利用浅层土壤水。而在 2017 年 10 月—2018 年 6 月,浅层土壤含水量小于 30.0%,明显低于 2017 年 3—6 月和 2018 年 10 月至 2019 年 6 月。因此樟树在该时期除了利用浅层土壤水外,加大了对 20—40 cm 土壤水的利用比例。

在 7—9 月的干旱期,樟树吸水层位明显下移,这与植物所处生长阶段和土壤水分状况有关。通常樟树在 7—9 月处于生长旺盛期,蒸腾和蒸发强烈,耗水量大^[27],各土层含水量明显低于年内其他时期。因此,该时期樟树利用水分的层位明显下移。如 2017 年 7—9 月,樟树主要利用 20—60 cm 土壤水,但在 2018 年 7—9 月的干旱期,樟树不仅吸收 20—60 cm 的土壤水,同时由于期间偏多降水对浅层土壤水补给,樟树还吸收来自 0—20 cm 的浅层土壤水。在 2019 年 7—9 月,由于长时间无降水补给,表层土壤水分亏缺严重,含水量仅为 21.9%;而相较于表层土壤水,60—100 cm 深层土壤水分充足,含水量均保持在 31.3%以上。因此,樟树通过深层根系吸收 60—100 cm 较充足的土壤水以维持生长。刘自强等^[28]研究证明,北京山区内的侧柏和栓皮栎水分利用也具

有类似的特征。

通过分析不同时期樟树吸收水分的土层来源发现,樟树吸水的层位除了与土壤含水量高低和植物所处生长阶段有关外,还受其根系分布影响。由图 6 可知,樟树根系在 0—100 cm 内均有分布。其中 0—60 cm 土层内的根系生物量占根系总量的 94.6%;而直径 ≤ 2 mm 的细根也主要分布在 0—60 cm,占细根总量的 76.1%。因此,樟树在多个时期主要利用 60 cm 以上的土壤水。而在异常干旱的 2019 年 7—9 月,樟树利用 60—100 cm 中 23.9% 的细根获取了 50% 左右的土壤水以维持生长,这表明细根的分布对樟树水分获取具有重要影响。类似结果在其他研究区也被证实^[3,29]。比较发现,整个观测期内樟树吸水的土层来源随土壤含水量的低和高而表现出深和浅之间的转换,这种转换表明樟树根系存在明显的二形态特征^[6],类似结果在其他季节性干旱地区屡有发现^[21,28,30]。由于该研究地点位于亚热带季风区,降水变率大,季节性干旱频发,樟树根系的二形态特征对缓解季节性干旱,提高植物水分利用效率有重要的意义。

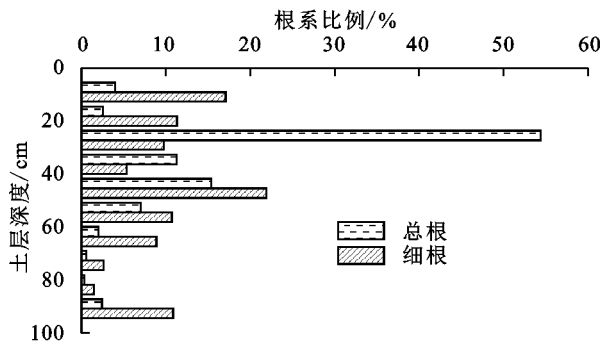


图 6 研究样地所选樟树根系的垂向分布

4 结论

直接比较法、水线法、Iso-Source 模型和 MixSIR 模型对樟树吸水层位的判别结果基本一致。樟树主要吸水层位在不同水分条件下表现出明显差异。在 2017 年 3—6 月、2017 年 10 月至 2018 年 6 月和 2018 年 10 至 2019 年 6 月的湿润期,樟树分别主要利用 0—20, 0—40, 0—20 cm 土层的土壤水。在干早期,樟树吸水深度较年内其他时段明显下移。樟树在 2017 年、2018 年的 7—9 月分别主要利用 20—60, 0—60 cm 土层的土壤水;而在干旱胁迫最严重的 2019 年 7—9 月,樟树则主要利用 60—100 cm 土层的土壤水以维持自身生长。

在各湿润期的 5—6 月以及在 2018 年 7—9 月的干早期,由于土壤水中稳定同位素组成随土层深度增加不存在明显梯度变化,直接比较法、Iso-Source 模型和 MixSIR 模型均无法准确判别和模拟出樟树对

各层土壤水的利用状况。而水线法则克服了上述 3 种方法在判别植物水分利用来源中的不足,很好地揭示了 2 类时期樟树吸收水分的土层来源。

在利用 ^2H 和 ^{18}O 作为示踪剂进行樟树吸水的土层来源定量研究中, MixSIR 模型根据 2 种示踪剂计算得到的樟树主要吸水层位基本一致,且对主要吸水层位的利用比例较为接近; Iso-Source 模型根据 2 种示踪剂计算得到的樟树主要吸水层位和对主要吸水层位的利用比例均存在一定差异。由于 Iso-Source 模型计算过程中没有考虑植物茎秆水和各层土壤水中稳定同位素组成的空间异质性,该模型计算结果的准确性较 MixSIR 模型更低。

参考文献:

- [1] Xu Q, Li H B, Chen J Q, et al. Water use patterns of three species in subalpine forest, Southwest China: The deuterium isotope approach[J]. *Ecohydrology*, 2011, 4 (2): 236-244.
- [2] Coleman N T. Isotopes and radiation in soil-plant nutrition studies[J]. *Immunogenetics*, 1967, 31(1): 67-69.
- [3] 邓文平, 余新晓, 贾国栋, 等. 利用稳定氢氧同位素定量区分栓皮栎旱季水分来源的方法比较[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(3): 412-422.
- [4] Wang P, Song X F, Han D M, et al. A study of root water uptake of crops indicated by hydrogen and oxygen stable isotopes: A case in Shanxi Province, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(3): 475-482.
- [5] 寿文凯, 胡飞龙, 阿拉木萨, 等. 基于 SPAC 系统干旱区水分循环和水分来源研究方法综述[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2194-2202.
- [6] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(9): 1073-1082.
- [7] Brunel J, Walker G R, Kennett-Smith 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(1): 351-368.
- [8] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [9] Moore J W, Semmens B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(5): 470-480.
- [10] 李楠. 基于稳定氧同位素的黄土丘陵区不同树龄枣树土壤水分利用研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [11] Wang J, Lu N, Fu B J. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source

- partitioning[J]. Science of the Total Environment, 2019, 666: 683-693.
- [12] Oerter E, Finstad K, Schaefer J, et al. Oxygen isotope fractionation effects in soil water via interaction with cations (Mg, Ca, K, Na) adsorbed to phyllosilicate clay minerals[J]. Journal of Hydrology, 2014, 515: 1-9.
- [13] 马小军, 靳静静, 司炳成, 等. 提取方法对土壤水同位素和植物水源分割的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1840-1846.
- [14] 黄一民, 宋献方, 章新平, 等. 洞庭湖流域不同水体中同位素研究[J]. 地理科学, 2016, 6(8): 1252-1260.
- [15] 戴军杰, 章新平, 罗紫东, 等. 长沙地区樟树林土壤水稳定同位素特征及其对土壤水分运动的指示[J]. 环境科学研究, 2019, 32(6): 974-983.
- [16] Evaristo J, Jasechko S, McDonnell J J. Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow[J]. Nature, 2015, 525(7567): 91-94.
- [17] Yang B, Wen X, Sun X. Irrigation depth far exceeds water uptake depth in an oasis cropland in the middle reaches of Heihe River Basin[J]. Scientific Reports, 2015, 5(5): 289-296.
- [18] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolostone outcrops and nearby thin soils in subtropical China[J]. Plant and Soil, 2011, 341(1/2): 399-412.
- [19] 姚天次, 章新平, 谢宇龙, 等. 长沙地区近地面水汽中氢氧稳定同位素的变化特征[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 545-553.
- [20] 刘文茹, 彭新华, 沈业杰, 等. 激光同位素分析仪测定液态水的氢氧同位素及其光谱污染修正[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1181-1186.
- [21] Yang B, Wen X F, Sun X M, et al. Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201: 218-228.
- [22] 吴华武, 章新平, 关华德, 等. 不同水汽来源对湖南长沙地区降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1404-1414.
- [23] Craig H. Isotopic variations in meteoric water[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [24] Leng X, Cui J, Zhang S, et al. Differential water uptake among plant species in humid alpine meadows[J]. Journal of Vegetation Science, 2013, 24(1): 138-147.
- [25] Brett M T. Resource polygon geometry predicts Bayesian stable isotope mixing model bias[J]. Marine Ecology Progress Series, 2014, 514: 1-12.
- [26] Sun S J, Meng P, Zhang J S, et al. Variation in soil water uptake and its effect on plant water status in *Juglans regia* L. during dry and wet seasons[J]. Tree Physiology, 2011, 31(12): 1378-1389.
- [27] 罗紫东, 关华德, 章新平, 等. 亚热带樟树干液流量变化规律[J]. 热带地理, 2016, 36(4): 658-665.
- [28] 刘自强, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京山区侧柏和栓皮栎的水分利用特征[J]. 林业科学, 2016, 52(9): 22-30.
- [29] Liu Y H, Xu Z, Duffy R, et al. Analyzing relationships among water uptake patterns, rootlet biomass distribution and soil water content profile in a subalpine shrubland using water isotopes[J]. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(6): 380-386.
- [30] Wang J, Lu N, Fu B. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607: 27-37.

(上接第 266 页)

- [12] 汤洁, 荣广智, 张勇, 等. 吉林西部盐碱区农田土壤盐碱程度与碳的稳定同位素比值的关系统[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(7): 68-74.
- [13] Tang J, Liang S, Li Z Y, et al. Emission law and influence factors of greenhouse gases in saline-alkali paddy fields[J]. Sustainability, 2016, 163: 1-14.
- [14] 汤洁, 刘禹晴, 王思宁, 等. 吉林西部盐碱地区稻田土壤有机碳矿化特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 162-168.
- [15] 郑必昭. 土壤分析技术指南[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [16] 刘晓东, 杨靖宇, 王林, 等. 南京城市绿地土壤对菲的吸附特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1563-1568.
- [17] 郭令, 王艳娇, 张莹, 等. 融雪剂对 Cd 在土壤中吸附规律及动力学影响[J]. 土壤科学, 2019, 7(3): 226-232.
- [18] 叶万军, 吴云涛, 杨更社, 等. 干湿循环作用下古土壤细微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2126-2136.
- [19] 李裕瑞, 范朋灿, 曹智, 等. 基于扫描电镜解析毛乌素沙地砒砂岩与沙复配成土的微观结构特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(4): 707-719.
- [20] 赵满兴, 王文强, 周建斌. 温度对土壤吸附有机碳中可溶性有机碳、氮的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 842-846.
- [21] 吕艳超, 中华平, 周世伟, 等. 长期不同施肥潮土对可溶性有机碳的吸附特征[J]. 中国土壤与肥料, 2017(2): 5-10.
- [22] 李太魁, 王小国, 朱波. 紫色土可溶性有机碳的吸附—解吸特征[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 721-727.
- [23] 徐晓腾. 苏打盐碱地水田“淡化表层”土壤的物理、化学及生物特性[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
- [24] 吕艳超, 詹志杰, 王小利. 长期施肥下黄壤水稻土对可溶性有机碳的吸附特征[J]. 耕作与栽培, 2016(3): 4-7.