

# 亚热带典型植物水分利用来源变化的水稳定同位素分析

王锐<sup>1</sup>, 章新平<sup>1,2</sup>, 戴军杰<sup>1</sup>, 罗紫东<sup>1</sup>, 贺新光<sup>1,2</sup>, 关华德<sup>3</sup>

(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:**旨在揭示亚热带湿润地区不同植物水分利用来源和了解区域森林系统水文循环过程,以长沙地区典型常绿植物樟树、刺杉和野茶花为研究对象,利用稳定同位素技术及 Iso-source 混合模型定量分析不同植物水分利用特征及其对降水的响应。结果表明:在 2018 年 9 月至 2019 年 2 月的观测期内,0—10 cm 土壤中  $\delta D$  与降水中的  $\delta D$  的变化趋势基本一致,均随时间变化逐渐偏正。随深度的增加,土壤中  $\delta D$  受降水影响的程度逐渐减小并趋于稳定。在 9—11 月,3 种植物对降水响应程度低,植物茎秆水中  $\delta D$  并未随降水中的  $\delta D$  表现出明显偏正的趋势,在 12 月至翌年 2 月,3 种植物对降水响应明显,植物茎秆水中  $\delta D$  与降水中的  $\delta D$  变化趋势一致。观测期内 3 种植物水分利用深度均随时间变化由深变浅。在 9 月,3 种植物主要利用 60—100 cm 土壤水,利用比例均超过 65%。在 10—11 月,3 种植物水分利用状况存在显著差异,樟树对 0—10,10—20,20—60,60—100 cm 4 个土层的水分利用较均匀,利用比例分别为 28.2%,23.5%,22.0%,26.3%;刺杉主要利用 0—10,60—100 cm 土壤水,利用比例分别为 56.4%和 22.2%;林外野茶花主要利用 0—20 cm 浅层土壤水,利用比例为 67.4%。在 12 月至翌年 2 月,3 种植物主要利用 0—10 cm 土壤水,利用比例均在 70%以上。

**关键词:**水稳定同位素; Iso-source 混合模型; 土壤; 植物; 水分利用

**中图分类号:** S152.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2020)01-0202-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.029

## Variation in Water Uptake Sources of Typical Plants in Subtropical Area Based on Stable Isotope Measurements

WANG Rui<sup>1</sup>, ZHANG Xinping<sup>1,2</sup>, DAI Junjie<sup>1</sup>, LUO Zidong<sup>1</sup>, HE Xinguang<sup>1,2</sup>, GUAN Huade<sup>3</sup>

(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:** To reveal the water—uptake patterns of different plant species in subtropical humid area and to understand the hydrological cycle of regional forest system, the typical evergreen plant species *Cinnamomum camphora*, *Cunninghamia lanceolata*, and *Camellia pitardii* in Changsha were used as research objects by using stable isotope techniques and Iso—source Mixed Model for quantitative analysis of the water-uptake patterns of different plant species and their responses to precipitation. The results showed that the variations of  $\delta D$  in water from 0—10 cm soil layer and the  $\delta D$  in precipitation are basically identical, and the two kind of  $\delta D$  become more positive with time gradually during the observation period from September 2018 to February 2019. With the increase in depth, the influence of precipitation on  $\delta D$  in soil water gradually reduced and tended to be stable. During September to November, the reflection to precipitation of the three plant species became smaller. The  $\delta D$  in the plant stem water did not show more positive in line with the  $\delta D$  in precipitation. From December to the next February, the three plant species responded sensitively to precipitation. The variation of  $\delta D$  in plant stem water was consistent with the change of  $\delta D$  in precipitation. During the observation period, the water use depth of these plants changed from deep to shallow with time. In September, these plants mostly used 60—100 cm soil water, and the proportion exceeded 65%. During October to November, there were obvious differences in the water-uptake patterns of these plants. The water use of *C. camphora* from the four soil layers for 0—10, 10—20, 20—60 and 60—100 cm was relatively uniform, and the proportion was 28.2%, 23.5%, 22.0%, and 26.3% respectively; *C. lanceolata* primarily used 0—10 and

收稿日期:2019-06-28

资助项目:国家自然科学基金项目(41571021)

第一作者:王锐(1995—),男,重庆人,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,湖南长沙人,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

60—100 cm soil water, and the proportion was 56.4% and 22.2% respectively; *C. pitardii* principally absorbed 0—20 cm shallow soil water, the proportion was 67.4%. From December to February of the next year, these plants generally used 0—10 cm soil water, and the proportion was above 70%.

**Keywords:** water stable isotope; Iso—source mixed model; soil; plants; water utilization

植物作为维持区域森林生态系统稳定的重要环节,不同时期植物水分利用状况反映了区域森林系统水文特征和环境特征。因此通过研究植物水分利用来源,对理解区域森林系统内部水循环过程和生态环境的保护具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着稳定同位素技术的日趋成熟,稳定同位素示踪方法常被运用于研究土壤水分迁移<sup>[4]</sup>、局部森林系统水文过程<sup>[5]</sup>和植物水分利用来源<sup>[6]</sup>等生态水文学的热点问题。寿文凯等<sup>[7]</sup>认为,稳定同位素示踪技术能否用于研究植物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)植物利用的各潜在水源中稳定同位素组成存在差异。一些研究<sup>[8-9]</sup>发现,除少数盐生植物和旱生植物外,植物根系吸收的水分在植物内部运输的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,当植物的各潜在水源中稳定同位素组成存在差异时,稳定同位素示踪技术可以作为判别植物水分利用来源的有效方法。相比于根系挖掘法<sup>[10]</sup>和植物液流法<sup>[11]</sup>等传统方法而言,利用稳定同位素示踪法研究植物水分利用来源具有操作便捷、精确度高和对生态环境破坏小等优点。

目前,国内外基于稳定同位素技术进行植物水分利用来源的研究成果已很丰硕。Eggemeyer 等<sup>[12]</sup>对美国内布拉斯加州半干旱沙丘草原上 2 种入侵木本植物黄松(*Pinus ponderosa*)、圆柏(*Juniperus virginiana*)和 2 种 C<sub>4</sub>草本水分利用特征的研究发现,C<sub>4</sub>草本主要利用 5—50 cm 土壤水,而在生长期黄松和圆柏的根系对不同深度土壤水分状况具有较高的敏感度,即植物水分利用深度与较高土壤含水量的空间分布具有一致性。周海等<sup>[13]</sup>通过对准噶尔盆地东南边的红砂(*Reaumuria soongorica*)和白刺(*Nitraria sibirica*)水分利用的研究发现,2 种植物根系在吸收土壤水分的过程中表现出显著的二形态特征,即植物在春季(雨季)和夏秋季(旱季)分别主要利用表层土壤水和深层土壤水。赵国琴等<sup>[2]</sup>、曾巧等<sup>[14]</sup>和吴华武等<sup>[15]</sup>研究发现,在不同环境条件下植物水分利用来源存在显著差异。Yang 等<sup>[16]</sup>对江西千烟洲地区马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliottii*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)水分利用研究发现,在同一森林系统下 3 种植物水分利用深度相似。虽然

通过稳定同位素示踪的方法可以有效地判别植物水分利用来源,但无法给出植物对各水源的利用比例,因此需要结合相关数学模型进行定量分析<sup>[17]</sup>。巩国丽等<sup>[18]</sup>通过比较不同模型在定量分析植物水分利用来源中发现,三源线性模型仅在水源不超过 3 个条件下计算植物对各水源的利用比例,而利用多源线性混合模型(Iso—source)可以同时计算多个水源对植物水分利用的贡献率。当前,我国利用稳定同位素技术和相关数学模型对植物水分利用来源的研究主要集中在干旱半干旱地区<sup>[6,15,19]</sup>和喀斯特地区<sup>[20]</sup>,而对我国非喀斯特的亚热带湿润地区,不同群落环境内植物水分利用状况的研究较少。

该研究以亚热带湿润地区的长沙作为研究区域,以常绿乔木樟树、刺杉和常绿灌木野茶花为研究对象,基于稳定同位素技术,采用 Iso—source 混合模型,结合相关环境因子,通过分析观测期内降水、土壤水和不同植物茎秆水中稳定同位素变化特征,探究不同环境条件下不同植物水分利用模式及其对相关环境变化的适应机制。研究结果可为区域森林系统结构的优化和造林树种的选择提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区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。研究区域受典型亚热带季风性气候的影响,四季分明,雨热同期。夏季湿热,冬季阴冷,多年平均气温为 17.4 ℃,热量充足。多年平均蒸发量为 902 mm,多年平均降水量为 1 415 mm,降水主要集中在 3—8 月,该时段降水量占全年降水量的 70.3%,9 月至翌年 2 月的降水量占全年降水量的 29.7%。研究区地下水埋藏深度达 18 m,植物根系主要分布在 1 m 以内,因此地下水作为植物不可利用的水源。样地以红壤为主,质地为粉砂质黏壤土。植被覆盖以常绿阔叶乔木樟树(*Cinnamomum camphora*)为优势种,刺杉(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等常绿针叶乔木为伴生种的人工混交林。林地边缘分布有人工种植的野茶花(*Camellia pitardii*)、板栗树(*Castanea mollissima*)和桔子树(*Citrus reticulata*)等。该研究选取混交林内樟树、刺杉和林外野茶花作为研究对象,其生长状况和形态特征见表 1。

### 1.2 样品采集

于 2018 年 9 月至 2019 年 2 月采集植物和土壤样

品,每月采集 1~2 次,共 10 次。采集植物样品时,选择 3 株长势较好、具有代表性的樟树、刺杉和野茶花,剪取已经木质化的小枝(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。分别在林内、林外的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。钻孔深度为 100 cm,0—20 cm 取样间隔为 5 cm,20 cm 以下取样间隔为 10 cm,每层取 3 个平行样。采集的土壤样品分为 2 份:一份密封于 10 mL 的玻璃瓶中用于测定土壤水中稳定同位素比率;另一份装入铝盒中,在实验室利用烘干法测定土壤含水量<sup>[21]</sup>。

表 1 样地植物基本概况

样地类型	面积/ m <sup>2</sup>	样树 树种	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	树龄/ a	胸径 (地径)/cm	高度/ m
林内混交林	20×20	樟树	1125	18	21.4	9.0
		刺杉	275	13	16.9	7.5
林外灌丛	5×10	野茶花	1500	5	1.5	1.2

研究区的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 的降水量)和次日 8:00(代表当日 20:00 至次日 8:00 的降水量)收集的降水量之和记为当日的降水量,相应时段的降水中稳定同位素值也记为当日。

### 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秆水。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。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: $R_{\text{sample}}$  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(D/<sup>1</sup>H)。δD 的测试精度为±0.6‰。

由于植物茎秆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分别造成测定的植物茎秆水中稳定同位素值偏正和偏负,因此需要对醇类污染进行校正<sup>[22-23]</sup>。该研究所选植物茎秆水中仅发现甲醇类污染,通过试验建立的甲醇类污染误差校正曲线为:

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

式中:ΔδD 表示甲醇类污染导致的氘稳定同位素值误

差;NB 为窄带系数,反映水样中甲醇的污染程度,由 LGR 公司提供的稳定同位素值分析处理软件获得。校正时稳定同位素值应为实测值减去误差值<sup>[24]</sup>。

### 1.4 Iso-source 模型简介

Iso-source 混合模型基于水稳定同位素平衡和水量平衡原理,并假设所有水源对植物水分利用的贡献率之和为 100%。将植物茎秆水和各水源中稳定同位素值代入 Iso-source 混合模型,通过计算各水源中稳定同位素组成在植物茎秆水中所占比例,从而计算各水源对植物水分利用的贡献率<sup>[17]</sup>。根据不同深度土壤水中稳定同位素组成的特点,将 0—100 cm 土壤分为 0—10,10—20,20—60,60—100 cm 4 个层次。将植物茎秆水和 4 个土层水中的 δD 代入模型进行计算,即:

$$\delta X = f_1 \delta X_1 + f_2 \delta X_2 + f_3 \delta X_3 + f_4 \delta X_4 \quad (3)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = 1 \quad (4)$$

式中:δX 为植物茎秆水中的 δD;δX<sub>1</sub>、δX<sub>2</sub>、δX<sub>3</sub> 和 δX<sub>4</sub> 分别为 4 个土层中土壤水的 δD;f<sub>1</sub>、f<sub>2</sub>、f<sub>3</sub> 和 f<sub>4</sub> 分别表示植物对各土层土壤水的利用比例。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子的变化

降水作为该试验场地水分的重要输入项,降水量大小、降水历时以及降水在林内外土壤剖面中运移过程对植物水分利用状况具有重要的影响。观测期内总降水量为 537.9 mm,主要集中在 11 月至翌年 2 月,累积降水量达 407.1 mm,占观测期总降水量的 75.7%;9—10 月正值秋旱,累积降水量为 130.8 mm,仅占观测期总降水量的 24.3%。根据对图 1 中日降水量数据的统计,观测期内的小雨事件(日降水量<10 mm)出现了 63 次,占总降水次数的 74.1%;中雨事件(10 mm≤日降水量<25 mm)出现了 21 次,占总降水次数的 24.7%;大雨事件(日降水量≥25 mm)仅出现了 1 次,占总降水次数的 1.2%。

林内外土壤含水量的变化表现出明显的阶段特征(图 1)。在 9 月,由于长时间无降水补给,林内外 20 cm 以上的土壤含水量均较低,且随土层深度的增加土壤含水量呈增加的趋势。在 10—11 月,由于取样前期几场大的降水事件的补给,林内外各层土壤含水量均表现出明显增加的趋势。各层土壤含水量的变化幅度较 9 月增大。在 12 月至翌年 2 月,受偏多降水量的影响,林内外各层土壤含水量整体上高于 9—11 月。各层土壤含水量的变化幅度较 9—11 月减小。由于降水对土壤水的补给能力随土层深度增加减弱<sup>[25]</sup>,林内外表层 0—10 cm 土壤受降水直接补给,含水量的变化幅度最大,随土层深度增加林内外含水量变化幅度逐渐减小。观测期内,林内外各土层含水量整体上随时间变化呈增加的趋势,且林内各层

土壤含水量增加的幅度均大于林外,这主要与林内外地表覆盖状况的差异有关。受乔木冠层遮挡和枯叶

堆积的影响,林内地表的蒸发较林外相对偏弱,因此林内各层土壤含水量增加幅度较林外更大。

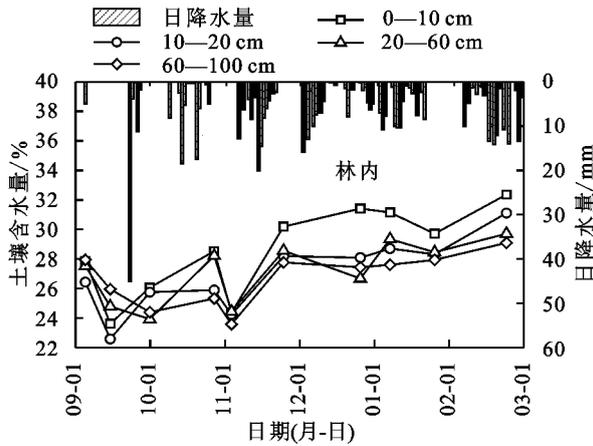
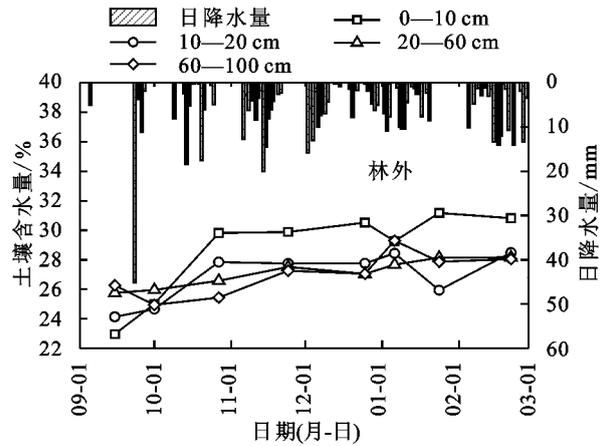


图 1 观测期内日降水量、林内和林外土壤含水量随时间的变化



## 2.2 不同水体中 $\delta D$ 的变化

观测期内降水中  $\delta D$  为  $-89.12\%$ ~ $20.65\%$ ,表现出随时间变化明显偏正的趋势(图 2)。9 月降水中  $\delta D$  的加权平均值为  $-73.78\%$ ,10—11 月为  $-38.32\%$ ,12 月至翌年 2 月为  $-22.95\%$ (表 2)。降水中稳定同位素阶段性地不断富集主要由夏季风的减弱以及水汽来源变化引起。在 9 月,长沙地区降水主要受夏季风影响,水汽在输送过程中不断凝结并以降水形式降落,剩余气团中稳定同位素组成不断被贫化,因此降水中稳定同位素偏负,且存在明显的降水量效应。而 10 月至翌年 2 月,长沙地区降水主要受高纬大陆气团的控制,该气团具有湿度低、蒸发性强的特点,且冬季降水较少,一般以小雨为主,汽团中稳定同位素在运输过程中被贫化程度低,因此降水中稳定同位素更富集,且不存在显著的降水量效应<sup>[26-27]</sup>。

比较而言,无论是在林内还是在林外,0—10 cm 土壤水中  $\delta D$  的变化幅度最大,分别为  $-76.83\%$ ~ $-22.17\%$ 和  $-74.13\%$ ~ $-17.18\%$ 。随土层深度增加,林内外土壤水中  $\delta D$  的变化幅度逐渐减小。受降水的直接影响,林内外 0—10 cm 土壤水中  $\delta D$  与降水中  $\delta D$  变化趋势基本一致,均随时间变化逐渐偏正。可以看出,林内外土壤水中  $\delta D$  随土层深度变化表现出不同的阶段特征。在 9 月,林内土壤水中  $\delta D$  随土层深度增加呈逐渐偏正的趋势,而林外土壤水中  $\delta D$  随土层深度增加呈先偏负后偏正的趋势;林内 0—10 cm 土壤水中  $\delta D$  较林外明显偏负,但在 10 cm 以下林内各层土壤水中  $\delta D$  与林外接近,这可能是林外 0—10 cm 土壤水中稳定同位素受蒸发富集作用较林内更强的缘故。在 10—11 月,林内外土壤水中  $\delta D$  随土层深度增加均表现出先偏负后偏正的趋势。从 12 月至翌年 2 月,林内外土壤水中  $\delta D$  随土层深度增加逐渐偏负。其中,0—60 cm 土壤水中  $\delta D$  均较前期偏正,60 cm 以下土壤水中  $\delta D$  均较前期

偏负。不同时期林内外土壤水中  $\delta D$  的垂向差异主要与降水在林内外土壤剖面的补给过程有关,降水优先补给表层土壤水,在表层土壤水饱和后推动前期土壤水逐层向下运移补给深层土壤水。

樟树、刺杉和野茶花茎秆水中  $\delta D$  的变化范围分别为  $-59.21\%$ ~ $-32.81\%$ , $-59.14\%$ ~ $-34.10\%$ , $-64.72\%$ ~ $-21.33\%$ 。在 9—11 月,樟树、刺杉和野茶花茎秆水中  $\delta D$  较为接近,3 种植物茎秆水中  $\delta D$  并未随降水中  $\delta D$  表现出明显偏正的趋势,表明 3 种植物对降水的响应程度低。在 12 月至翌年 2 月,3 种植物茎秆水中  $\delta D$  较前期明显偏正,并与降水中  $\delta D$  的变化趋势一致。不同时期内 3 种植物对降水响应的差异可能与植物水分利用来源的变化有关。

由于植物茎秆水主要来源于土壤水,因此,二者的水稳定同位素之间存在一定程度的传承关系。图 3 为观测期内 10 次采样中樟树、刺杉和野茶花茎秆水与不同深度土壤水中  $\delta D$  的关系,代表 10 次取样前后一段时间内水分在土壤—植物之间的平均转换。

在 9 月,樟树和刺杉茎秆水中的  $\delta D$  与林内 60—70 cm 土壤水中的  $\delta D$ 、野茶花茎秆水中的  $\delta D$  与林外 80—90 cm 土壤水中的  $\delta D$  接近,表明 3 种植物主要利用深层土壤水维持自身生长。在 10 月 1 日,樟树和刺杉茎秆水中的  $\delta D$  与林内 0—10 cm 土壤水中的  $\delta D$  接近,说明樟树和刺杉主要利用表层 0—10 cm 土壤水;与此同时,野茶花茎秆水中的  $\delta D$  与林外 10—40 cm 土壤水中的  $\delta D$  接近,说明野茶花主要利用 10—40 cm 土壤水。从 10 月 27 日至 11 月 24 日,樟树和刺杉茎秆水中的  $\delta D$  与林内 10—15,80—100 cm 土壤水中的  $\delta D$  相近,说明 2 种植物可能对这 2 层土壤水均有利用;在 10 月 27 日,野茶花茎秆水中的  $\delta D$  与林外 10—15 cm 和 70—80 cm 土壤水中的  $\delta D$  接近,表明野茶花可能对这 2 层土壤水均有利用;在 11 月 24 日,野茶

花茎杆水中的  $\delta D$  与林外 0—20 cm 土壤水中的  $\delta D$  接近,表明野茶花主要利用 0—20 cm 土壤水。在 12 月 25 日至 2 月 22 日,樟树和刺杉茎杆水中的  $\delta D$  与

林内 0—20 cm 土壤水中的  $\delta D$ 、野茶花茎杆水中的  $\delta D$  与林外 0—20 cm 土壤水中的  $\delta D$  接近,表明 3 种植物主要利用 20 cm 以上的土壤水。

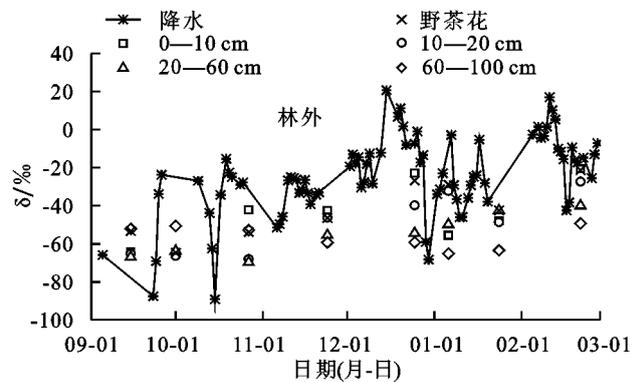
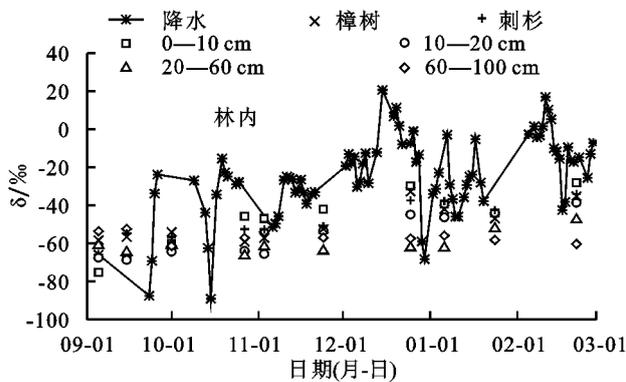


图 2 观测期内降水、植被茎杆水以及林内和林外土壤中  $\delta D$  随时间的变化

表 2 不同时期降水、土壤水和植物茎杆水中  $\delta D$  的变化

单位:‰

项目	整个观测期		9 月	10—11 月	12 月至翌年 2 月	
	最大值	最小值				
植物	降水	20.65	-89.12	-73.78±18.86	-38.32±15.60	-22.95±17.99
	樟树	-32.81	-59.21	-57.49±1.18	-56.80±3.02	-39.25±6.46
	刺杉	-34.10	-59.14	-54.80±3.81	-52.90±2.01	-37.94±3.42
	野茶花	-21.33	-64.72	-53.35±1.13	-54.98±9.21	-29.88±8.99
林内土层	0—10 cm	-22.17	-76.83	-71.13±5.00	-48.67±9.08	-35.38±8.69
	10—20 cm	-37.35	-70.22	-68.14±1.95	-61.84±6.50	-43.46±3.78
	20—60 cm	-41.24	-69.77	-62.84±2.54	-63.26±3.59	-56.10±8.25
	60—100 cm	-49.04	-63.21	-53.03±3.14	-57.40±3.75	-57.10±2.76
林外土层	0—10 cm	-17.18	-74.13	-64.08±0.42	-50.03±13.65	-36.16±15.82
	10—20 cm	-24.36	-67.97	-65.16±0.82	-56.71±12.13	-36.99±9.00
	20—60 cm	-36.18	-72.38	-66.94±1.36	-62.97±7.14	-46.63±8.55
	60—100 cm	-43.98	-66.81	-54.55±6.07	-54.27±5.91	-59.27±7.35

注:表中数据为平均值±标准差。

### 2.3 植物水分利用来源的模拟

尽管通过比较植物茎杆水和土壤水中稳定同位素相对丰度的大小可以对植物水分利用深度进行的初步判断,但无法实现对植物水分利用来源的定量分析,而利用 Iso-source 混合模型可模拟出不同时期植物对各层土壤水的利用比例。

由图 4 可知,在 9 月,樟树主要利用 60—100 cm 的土壤水,利用比例为 65.1%。在 10 月 1 日,樟树主要利用 0—10 cm 土壤水,利用比例为 43.8%;同时对 20 cm 以下土壤水的利用比例达 41.9%。在 10 月 27 日至 11 月 24 日,樟树对 4 个土层的水分利用均匀,其利用比例分别为 23.1%,26.6%,22.1%,28.3%。在 12 月 25 日至 2 月 22 日期间,樟树主要利用 0—10 cm 土壤水,利用比例高达 74.1%。在 1 月 24 日,樟树主要利用 10—20 cm 土壤水,利用比例为 53.8%。

由图 4 可知,在 9 月 15 日,刺杉对 60—100 cm 土壤水的利用比例最大,为 83.1%,而对其他层次土壤水利用比例较低。在 10 月 1 日,刺杉对 60—100 cm 土壤水的利用比例由降水前 83.1%降低到 11.5%,而对 0—10 cm 土壤水分利用比例由降水前的 5.5%增加到降水

后 68.0%,而其他深度水分利用较少。在 10 月 27 日至 11 月 24 日,刺杉主要利用 0—10 cm 土壤水,利用比例为 47.5%;其次是利用 60—100 cm 土壤水,利用比例为 22.2%。在 12 月 25 日至 2 月 22 日,刺杉主要利用 0—10 cm 土壤水,利用比例高达 72.5%,而对其他层次土壤水利用较少。

由图 4 可知,在 9 月 15 日,野茶花主要利用 60—100 cm 土壤水,利用比例达 91.0%,而对其他层次土壤水利用较少。在 10 月 1 日,野茶花主要利用 0—20 cm 土壤水,利用比例为 69.9%,其次是利用 20—60 cm 土壤水,利用比例为 25.6%。在 10 月 27 日至 11 月 24 日,野茶花主要利用 0—20 cm 土壤水,利用比例 66.2%。在 12 月 25 日和 2 月 22 日,野茶花主要利用 0—10 cm 土壤水,利用比例为 79.9%,而对其他深度土壤水利用较少。在 1 月 6 日,由于植物茎杆水中  $\delta D$  不在林外土壤水中  $\delta D$  的范围内,利用 Iso-source 混合模型无法计算出野茶花对各层土壤的利用比例,因此,该时间野茶花水分利用来源只能通过比较野茶花茎杆水和林外土壤水中  $\delta D$  的相对丰度进行判断。

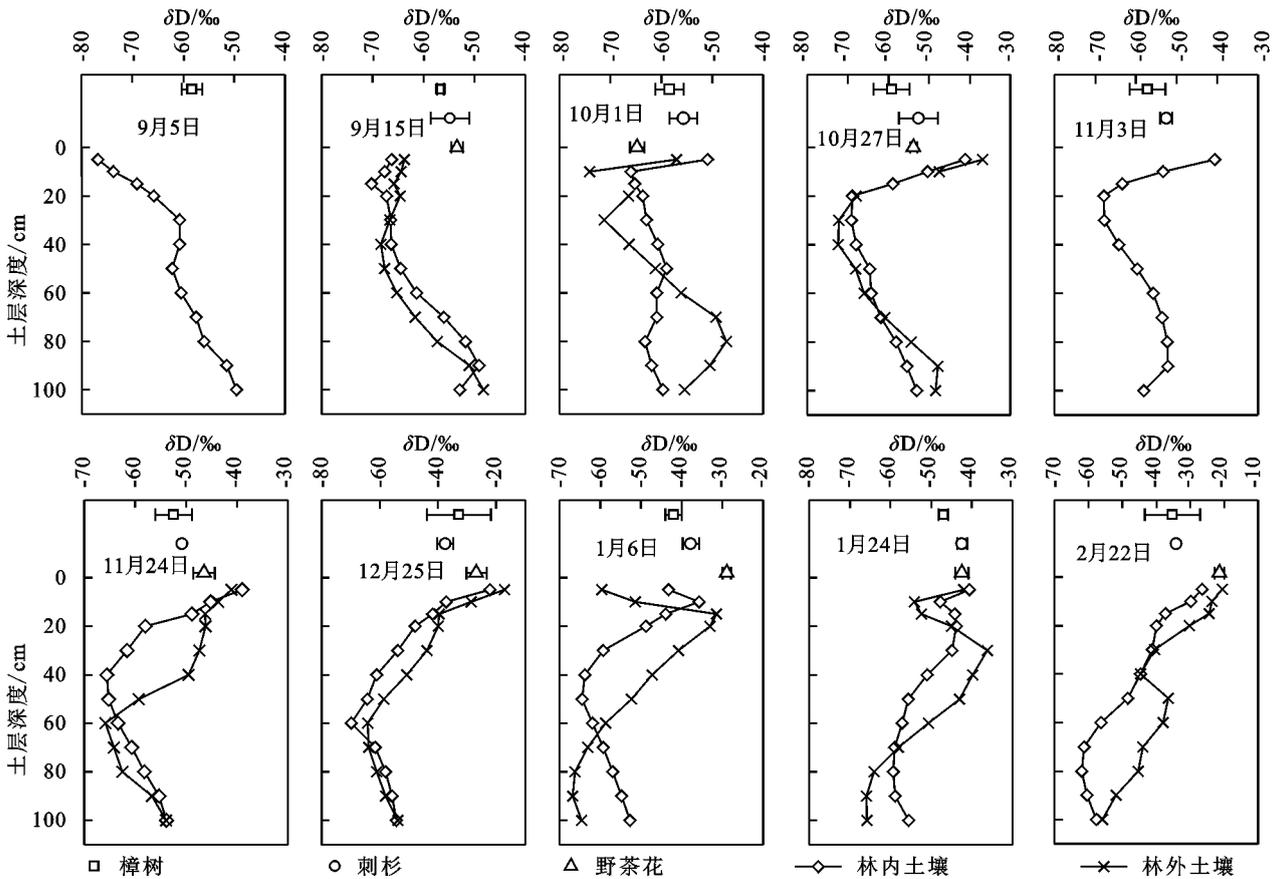


图 3 植物茎秆水中  $\delta D$  以及土壤水中  $\delta D$  垂直分布随时间的变化

### 3 讨论

植物从土壤中获取水源供自身生长,除了与自身根系状况有关外,还与土壤含水量、降水、蒸发等环境因素有密切关系<sup>[1,6,28]</sup>。通过比较植物茎秆水和不同深度土壤水中  $\delta D$  以及利用 Iso-source 混合模型对樟树、刺杉和野茶花水分利用来源的研究发现,在 9 月,3 种植物主要利用 60—100 cm 土壤水;在 12 月至翌年 2 月,3 种植物主要利用 0—10 cm 土壤水。两时期植物水分利用来源的差异与植物所处生长阶段和土壤水分状况有关。在 9 月,处于生长旺盛期的植物耗水量大,同时长时间无降水补给,林内外表层土壤水分亏缺,3 种植物均利用其深层根系吸收 60—100 cm 较为充足的土壤水。在 12 月至翌年 2 月,处于生长期末的植物耗水量小,同时连续性降水对土壤水分的补给,林内外表层 0—10 cm 土壤含水量明显高于其他土层。在表层土壤水分充足时,植物优先利用表层根系吸收表层土壤水<sup>[29-30]</sup>,因此在 12 月至翌年 2 月,3 种植物主要利用降水补给的 0—10 cm 的表层土壤水。

在 10—11 月,樟树、刺杉和野茶花水分利用来源存在显著差异。樟树对各层土壤水均有利用;刺杉主要利用 0—10 cm 土壤水,同时对 60—100 cm 深层土壤水保持一定的利用比例;野茶花主要利用 0—20 cm 土壤水。这可能与植物根系分布和植物本身对土壤含水量响应有关<sup>[31-32]</sup>。在试验样地采集土壤样时发现樟树和刺杉

根系在 1 m 以内均有分布。野茶花根系分布在 80 cm 以内,其中主要集中在浅层 0—20 cm。在 10—11 月,受降水补给,林外土壤含水量明显增加,野茶花主要利用表层根系吸收同期降水补给的 0—20 cm 土壤水。林内表层土壤水分受降水的直接补给,明显高于其他土层,因此刺杉对表层 0—10 cm 土壤水利用比例最大,为 56.4%。但由于该时期内表层含水量的变化幅度最大,水分状况不稳定,刺杉对深层较稳定而充足土壤水仍保持一定利用比例。樟树作为该试验场地的优势植物,生长期内需水量较大,而林内各层土壤水受降水补给,土壤含水量明显增加。为维持自身生长,樟树对各土层水分均有利用。

分析表明,植物根系总是在土壤含水量较高的土层具有较大的活性,吸水更多。观测期内,由于林内外各层土壤含水量随时间变化整体呈增加趋势,其中,表层土壤含水量增加幅度最大,3 种植物水分利用来源由深变浅,对 60—100 cm 土壤水利用比例逐渐减少,对表层 0—10 cm 土壤水利用比例逐渐增加。在 9 月和 12 月至翌年 2 月,3 种植物水分利用深度由深层土壤水转换为降水补给的表层土壤水,这种转换表明 3 种植物根系存在显著的二形态特征,类似结果在其他亚热带湿润区也有发现<sup>[1,16,20]</sup>。该研究区域位于亚热带季风区,降水变率大,季节性干旱频发,3 种植物根系的二形态特征是对本区域环境长期适应的结果,对于缓解

季节性干旱,维持植物自身生长具有重要的意义。比较发现,林内樟树和刺杉的水分利用存在一定程度的竞

争,因此在进行造林树种选择时应尽量避免混交或植物种植时尽量保持一定间隔。

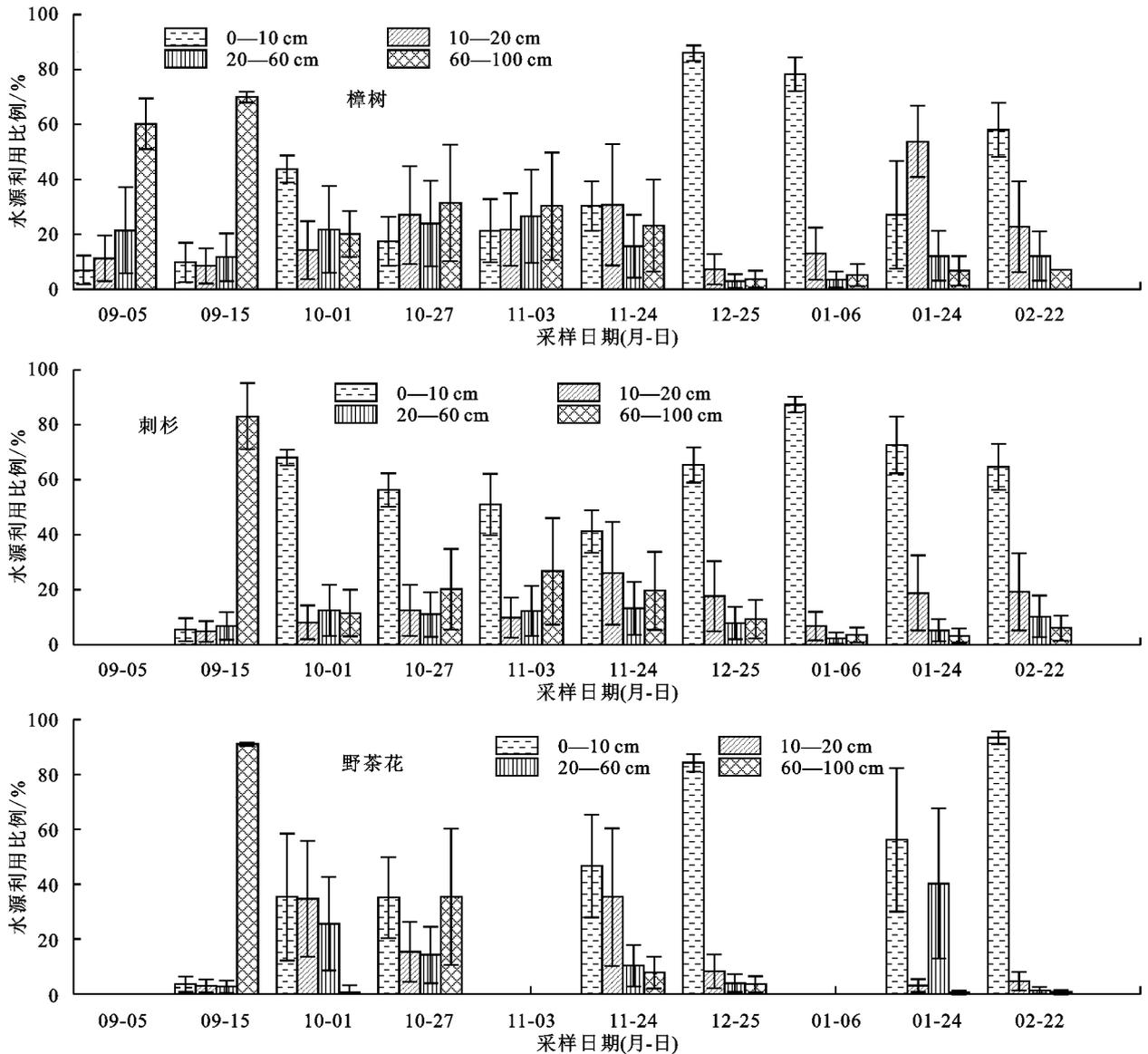


图 4 根据 Iso-source 混合模型计算的樟树、刺杉和野茶花对各土层水分的利用比例

## 4 结论

(1) 观测期内,降水中  $\delta D$  表现出自秋季到冬末明显偏正的趋势。9 月降水中  $\delta D$  的加权平均值为  $-73.78\%$ , 10—11 月为  $-38.32\%$ , 12 月至翌年 2 月为  $-22.95\%$ 。

(2) 受降水的直接影响,林内外 0—10 cm 土壤水中  $\delta D$  与降水中  $\delta D$  变化趋势基本一致,均随时间变化逐渐偏正。随着土层深度的增加,林内外土壤水中  $\delta D$  受降水的影响逐渐减小并趋于稳定。根据樟树、刺杉和野茶花茎秆水和降水中  $\delta D$  的变化发现,在 9—11 月,3 种植物对降水响应程度低,植物茎秆水中  $\delta D$  并未随降水中  $\delta D$  表现出明显偏正的趋势;在 12 月至翌年 2 月,3 种植物对降水响应明显,植物茎秆水中  $\delta D$  与降水中  $\delta D$  变化趋势一致。

(3) 观测期内樟树、刺杉和野茶花水分利用深度随时间变化逐渐由深变浅。在 9 月,3 种植物都主要

利用 60—100 cm 土壤水,其利用比例均超过 65%;在 10—11 月,3 种植物水分利用状况表现出显著的差异。樟树对 0—10, 10—20, 20—60, 60—100 cm 共 4 个土层的水分利用较均匀,利用比例分别为 28.2%, 23.5%, 22.0%, 26.3%;刺杉主要利用降水补给的 0—10 cm 土壤水和 60—100 cm 土壤水,利用比例分别为 56.4% 和 22.2%;而林外野茶花主要利用 0—20 cm 浅层土壤水,其利用比例为 67.4%。在 12 月至翌年 2 月,3 种植物都主要利用降水补给的 0—10 cm 土壤水,利用比例均在 70% 以上。整个观测期内,林内樟树和刺杉的水分利用来源相似,存在一定水分竞争。

### 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] 赵国琴, 李小雁, 吴华武, 等. 青海湖流域具鳞水柏枝植

- 物水分利用氢同位素示踪研究[J].植物生态学报,2013,37(12):1091-1100.
- [3] 杨国敏,王力.黑岱沟露天矿区排土场 2 种典型植物的水分来源及利用策略[J].自然资源学报,2016,31(3):477-487.
- [4] 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):1-12.
- [5] Luo Z D, Guan H D, Zhang X P, et al. Examination of the ecohydrological separation hypothesis in a humid subtropical area: Comparison of three methods [J]. Journal of Hydrology,2019,571:642-650.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes [J]. Plant and Soil,2007,291(1/2):93-107.
- [9] 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.
- [10] 朱林,许兴,赵小红,等.基于 $^{18}\text{O}$ 稳定同位素对银川平原北部 4 种灌木夏季水分利用特征研究[J].西北林学院学报,2012,27(4):24-30.
- [11] Luo Z D, Guan H D, Zhang X P, et al. Responses of plant water use to a severe summer drought for two subtropical tree species in the central southern China [J]. Journal of Hydrology:Regional Studies,2016,8:1-9.
- [12] Eggemeyer K D, Awada T, Harvey F E, et al. Seasonal changes in depth of water uptake for encroaching trees *Juniperus virginiana* and *Pinus ponderosa* and two dominant  $\text{C}_4$  grasses in a semiarid grassland [J]. Tree Physiology,2009,29(2):157-169.
- [13] 周海,赵文智,何志斌.两种荒漠生境条件下泡泡刺水分来源及其对降水的响应[J].应用生态学报,2017,28(7):2083-2092.
- [14] 曾巧,马剑英.黑河流域不同生境植物水分来源及环境指示意义[J].冰川冻土,2013,35(1):148-155.
- [15] 吴华武,李小雁,蒋志云,等.基于 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的青海湖流域芨芨草水分利用来源变化研究[J].生态学报,2015,35(24):8174-8183.
- [16] 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.
- [17] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources [J]. Oecologia,2003,136(2):261-269.
- [18] 巩国丽,辉陈,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[J].生态学报,2011,31(24):7533-7541.
- [19] Zhao Y, Chen Z, Fan W, et al. Water utilization characteristics of 7 typical plant species in hilly region of Taihang Mountains [J]. Science of Soil and Water Conservation,2010,8(5):61-66.
- [20] 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.
- [21] 王玉阳,陈亚鹏,李卫红,等.塔里木河下游典型荒漠河岸植物水分利用来源[J].中国沙漠,2017,37(6):1150-1157.
- [22] Zhang C C, Li X Y, Wu H W, et al. Differences in water-use strategies along an aridity gradient between two coexisting desert shrubs (*Reaumuria soongorica* and *Nitraria sphaerocarpa*): Isotopic approaches with physiological evidence [J]. Plant and Soil,2017,419(1/2):169-187.
- [23] Schultz N M, Griffis T J, Lee X, et al. Identification and correction of spectral contamination in  $^2\text{H}/^1\text{H}$  and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  measured in leaf, stem, and soil water [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry,2011,25(21):3360-3368.
- [24] 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.
- [25] 田立德,姚檀栋, Tsujimura M, 等.青藏高原中部土壤中稳定同位素变化[J].土壤学报,2002,39(3):289-295.
- [26] 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 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响[J].自然资源学报,2012,27(8):1404-1414.
- [27] 周慧,章新平,姚天次,等.长沙降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化对上游降水的响应分析[J].第四纪研究,2019,39(2):294-308.
- [28] 刘自强,余新晓,邓文平,等.华北山区油松侧柏降雨前后水分来源[J].中国水土保持科学,2016,14(2):111-119.
- [28] 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.
- [30] 聂云鹏,陈洪松,王克林.石灰岩地区连片出露石丛生境植物水分来源的季节性差异[J].植物生态学报,2011,35(10):1029-1037.
- [31] 韩烈保,王琼,王晓蓓,等.不同立地条件下荆条根系分布规律[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(2):231-237.
- [32] 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.