

DOI: 10.5846/stxb201910302294

曾祥明, 徐宪立, 钟飞霞, 易汝舟, 徐超昊, 张耀华. MixSIAR 和 IsoSource 模型解析植物水分来源的比较研究. 生态学报, 2020, 40(16): 5611-5619.
Zeng X M, Xu X L, Zhong F X, Yi R Z, Xu C H, Zhang Y H. Comparative study of MixSIAR and IsoSource models in the analysis of plant water sources. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5611-5619.

MixSIAR 和 IsoSource 模型解析植物水分来源的比较研究

曾祥明^{1,2,3}, 徐宪立^{1,3,*}, 钟飞霞^{1,3}, 易汝舟^{1,2,3}, 徐超昊^{1,2,3}, 张耀华^{1,2,3}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

摘要: 选取西南喀斯特地区次生林中主要优势植物刺楸 (*Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz.)、香椿 (*Toona sinensis*) 和化香 (*Platycarya strobilacea* Sieb. et Zucc.) 为研究对象, 通过对不同土壤深度的土壤水、泉水、雨水和植物采样, 利用氢氧稳定同位素技术, 借助 IsoSource 和 MixSIAR 两种模型分析植物水分来源, 通过直接相关法判断植物主要吸水来源来衡量两种模型的适用性。结果表明, 降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 3 月—6 月偏正, 在 6 月—8 月数据偏负, 存在明显的季节变化。在春季不同土壤层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值土壤深度增加而降低, 夏季呈现相反的规律。基于 IsoSource 和 MixSIAR 模型计算植物不同水分来源比例时存在一定差异。基于直接相关法定性分析植物水分来源表明 MixSIAR 模型计算结果可靠性高于 IsoSource 模型。基于均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 进行模型评价, 结果显示 MixSIAR 模型的 RMSE 结果小于 IsoSource 模型, 表明利用 MixSIAR 模型计算植物对各水源的利用比例适用性高于 IsoSource 模型。本文结果有助于在解析植物水分来源时为模型的选择提供参考。

关键词: 喀斯特; 氢氧稳定同位素; 水分来源; IsoSource 模型; MixSIAR 模型; 生态水文

Comparative study of MixSIAR and IsoSource models in the analysis of plant water sources

ZENG Xiangming^{1,2,3}, XU Xianli^{1,3,*}, ZHONG Feixia^{1,3}, YI Ruzhou^{1,2,3}, XU Chao hao^{1,2,3}, ZHANG Yaohua^{1,2,3}

1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Science, Changsha 410125, China

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

3 Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

Abstract: Plant water source is a prerequisite for research and management of agriculture and ecology. Especially in Karst areas, due to the special geological conditions, plants are prone to generally suffer in severe water deficit. Understanding the plant water sources is therefore important for ecological restoration. In this study, the main dominant plants in the secondary forest of southwest karst regions, *Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz., *Toona sinensis* and *Platycarya strobilacea* Sieb. et Zucc. were selected. Isotopic samples of soil moisture at different soil depth, spring water, rain water and plants were collected. We analyzed the plants water sources by IsoSource and MixSIAR models, and the performance of the two models were compared. The results showed that the $\delta^{18}\text{O}$ values of rainfall were positive during March to June, while these values were negative during June to September, 2017. Thus, the $\delta^{18}\text{O}$ of rainfall exhibited the significantly temporal or seasonal variations. The $\delta^{18}\text{O}$ values of soil moisture at different soil layers decreased with the increase of soil depth in spring, while

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571130073); 中国科学院创新交叉团队

收稿日期: 2019-10-30; 网络出版日期: 2020-06-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuxianliww@gmail.com

this circumstance was contrary in summer. There were significant differences in calculating the proportion of plants water sources between IsoSource and MixSIAR models. The analysis of plant water sources based on the direct inference approach showed that the performance of MixSIAR model was better than that of IsoSource model. The performance of MixSIAR model (Root Mean Square Error (RMSE), 0.61 in spring and 0.59 in summer) outperformed the IsoSource model (RMSE, 0.84 in spring and 0.74 in summer) in estimating the plants water sources. The results of the study can provide a beneficial guide in model decision for the future researchers in plant water sources.

Key Words: karst; hydrogen and oxygen stable isotopes; plant water sources; IsoSource model; MixSIAR model; ecohydrology

水作为生态系统中物质循环和能量流动的重要载体,在保障生态系统正常运作中起着至关重要的作用,同时也是植物正常生长发育所必须的,因此在缺水区极易成为植物生长的限制因子。在南方喀斯特地区,降水丰沛,但年降雨分配不均,存在明显的季节变化^[1],同时喀斯特地区土壤浅薄且不连续,土壤保水蓄水能力差,易形成干旱^[2],因此植物容易因缺水而导致死亡,对当地生态环境造成重大影响。植物水分来源是植被耗水的重要组成部分,对植物水分来源的解析有助于理解植被耗水规律,进而为喀斯特石漠化地区植被重建和生态恢复提供相关知识,因此研究喀斯特地区植物水分来源对于恢复和重建当地生态系统有着重要的意义。

研究植物水分来源方法有很多且存在较大差异。主要包括根系挖掘法^[3-4]、连续监测各潜在水分来源的含水量变化^[5]、监测植物黎明前水势^[6]和直接相关法^[7-11]。根系挖掘法能够根据有无根系分布来确定植物可能利用水源,但不能确定植物对各个水源的吸收比例同时也容易对植物生长环境造成极大的破坏^[12]。连续监测各潜在水分来源的含水量变化能够分析植物水源的季节变化,然而只适用于风化程度较高的地区。监测植物黎明前水势的方法不受植物所处环境的影响,适应范围广,但无法确定植物对各个水源的吸收比例。直接相关法的优势在于操作简单,但亦无法确定植物对各个水源的吸收比例。因此,这四种方法都存在不足,或者无法准确的分析出植物对不同水源的利用比例,或者适用范围小。

随着光谱测定稳定同位素技术的发展,同时植物(除少数盐生和旱生植物)根系吸收水在运输到未栓化茎秆之前,其同位素比率不会发生变化^[13],各水源之间氢氧稳定同位素存在显著差异^[14],因此氢氧稳定同位素已被广泛用于植物水分来源研究^[9,15-17]。量化植物水分来源模型主要有 IsoSource^[18]、MixSIR^[19]、SIAR^[20]和 MixSIAR^[21],然而各种方法定量区分的结果尚值得商榷。IsoSource 模型在计算植物水分来源中运用最广泛,但它只是基于简单的质量守恒,并未考虑随机测量误差与同位素分馏等不确定性对模型的影响^[22],而 MixSIAR 不仅融合了 MixSIR 和 SIAR 模型优势又加入源数据输入形式和分类变量等模块,能有效提高模型计算精度^[21]。Evaristo 等^[23]在比较二源质量守恒和贝叶斯混合模型计算植物水分来源时发现,贝叶斯混合模型能够更有效的评估植物水分来源的利用比例,Wang 等^[24]在研究半干旱区植物水分来源时发现 MixSIAR 和 SIAR 模型植物水分来源溯源效果优于 IsoSource 和 MixSIR 模型。因此在研究植物水分来源时,应该选择何种方法,研究者对该问题易产生困惑。同时 MixSIAR 是融合 MixSIR 和 SIAR 模型中的优势,所以有必要研究 IsoSource 和 MixSIAR 模型在计算植物水分来源时存在的差异及模型适用性。

为此本文利用氢氧稳定同位素技术,研究喀斯特地区次生林 3 种植物(刺楸、香椿和化香)在春夏两季水分来源利用情况,通过 IsoSource 和 MixSIAR 模型量化不同水源对植物茎秆水的贡献比例,评估两种模型在计算植物水分来源的表现并探索造成两者模型计算结果差异的潜在原因,希望能为以后研究者在研究喀斯特地区植物水分来源时应选择何种模型来解析水源对植物的贡献比例提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省普定县的陈旗流域(图 1)(105°42'—105°43' E, 26°14'—26°15' N),该区域属于典型

的亚热带季风湿润气候,年平均降雨量 1336 mm,年均温度为 14.2℃。植被覆盖率和覆盖度较高,次生林主要物种有香椿(*Toona sinensis*)、化香(*Platycarya strobilacea* Sieb.et Zucc.)和刺楸(*Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz.)等优势乔木,偶见合欢(*Albizia julibrissin* Durazz.)和白栎(*Quercus fabri* Hance)等乔木;下层偶见小叶冻绿(*Rhamnus utilis*)、小果蔷薇(*Rosa cymosa* Tratt.)等小型灌木。陈旗流域岩石主要包括白云岩和石灰岩,降雨主要集中在 5 月—10 月份^[25],研究区地形崎岖且土壤浅薄不连续^[26],保水蓄水能力差,同时由于山地被过度开垦,土壤结构出现严重破坏,导致严重的石漠化现象。

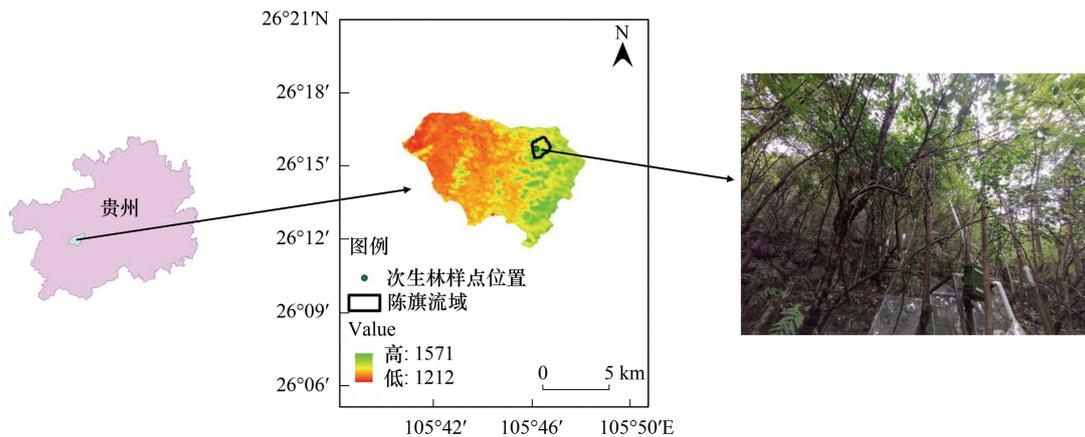


图 1 样点分布图

Fig.1 Location of the study sites

1.2 研究方法

选取次生林中优势物种:刺楸(*K. septemlobus* (Thunb.) Koidz.)、香椿(*T. sinensis*)和化香(*P. strobilacea* Sieb.et Zucc.)为研究对象。并在春季 2017 年 4 月 24 日—27 日,夏季 2017 年 7 月 8 日—10 日分别对不同土层土壤水、植物木质部水、泉水和降雨进行采样。

植物样品采集:每种植物选择大小相似位置相近的 3 棵植物分别采样,每棵植物采集一个样品。选择每棵植物茎秆直径为 0.1—0.3 cm,长度 4—5 cm 的枝条^[27],将树皮削去,取植物木质部放入采样瓶中。

土壤样品采集:在采样植物旁边选择挖掘一个土壤剖面,分别采集 10、20、30、40 cm 土壤层的土壤样品,每层土壤采集 3 个重复,此外在采样前剖面外 5 cm 的垂直面移除以防止蒸发对同位素产生影响,将采样土壤装入采样瓶中^[28]。

雨水和泉水样品采集:采样时间 2017 年 3 月—8 月。当样地单次降雨量可被收集时,用塑料容器采集以防止蒸发,当雨量足够多时,将降雨倒入采样瓶中。同时对山坡下方存在的两个泉眼进行水样采集,采集频率每 5 天 1 次。

将装有样品的所有采样瓶用封口膜密封,迅速放入带有冰盒的保温盒中,带回实验室后储存于-20℃的冰箱中。

1.3 实验分析

植物和土壤样品在低温真空条件下,利用 Vacuum Condensation Extraction System (LI-2000, LICA, China) 在 700Pa 压强下抽提植物木质部水和土壤水,样品中不同的水分含量影响植物抽提速度,一般抽提时间为 1.5—3h,抽提效率超过 98%。植物木质部在经过低温真空抽提之后,将所抽提的水经过 MCM (Micro-Combustion Module) 设备去除可能含有的有机物质,再用液态水同位素分析仪 (L2120-I, picarro, USA) 测定各水体的氢氧稳定同位素比率,其中氢稳定同位素比率精度为 1.5‰,氧稳定同位素比率精度为 0.2‰。根据同

位素表达式计算 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值: $\delta(\text{‰}) = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000$, 其中 $\delta(\text{‰})$ 为植物、土壤、雨水和泉水的氢

氧稳定同位素值, R_{sample} 和 R_{standard} 分别为样品中 $^2\text{H}/\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 以及国际通用标准物中 $^2\text{H}/\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 。氢氧稳定同位素计算结果以标准平均海水为标准。

1.4 数据分析

利用 IsoSource 和 MixSIAR 模型分别计算植物利用各水分来源比例, 其中在利用 IsoSource 模型计算植物水分来源过程中, Increment 为 1%, Tolerance 设定值一般不小于 Increment 增量与各水源同位素比率之间最大差值的乘积的一半^[18]。MixSIAR 模型输入的原始数据使用均值和标准差, Error structure 选择 Resid * Process, “MCMC” 的运行长度选择 “Very long”。通过模型评价指标均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 来衡量两模型计算结果的适用性。由于目前植物对不同水源的实际利用值无法直接观测^[29], 因此本研究将测得的植物木质部同位素比率作为观测值 (o_i), 预测值 (p_i) 通过以下公式计算^[24,30]:

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

式中, n 是植物水源个数, f_i 是 MixSIAR 和 IsoSource 模型计算植物对第 i 个水源的利用比例, δ_A 是不同水源的同位素比率。

模型效果评价指标 RMSE 计算公式:

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

所有计算结果用 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 降水及雨水同位素季节动态

在研究区内 2017 全年降雨为 996.7 mm, 其中 3 月—8 月总降雨为 657.2 mm, 占全年降雨量的 65.9%, 降雨相对集中。数据结果显示, 在 3 月—6 月, $\delta^{18}\text{O}$ 同位素为 $-2.39\text{‰} \pm 1.92\text{‰}$, 数据偏正, 在 6 月—8 月, $\delta^{18}\text{O}$ 同位

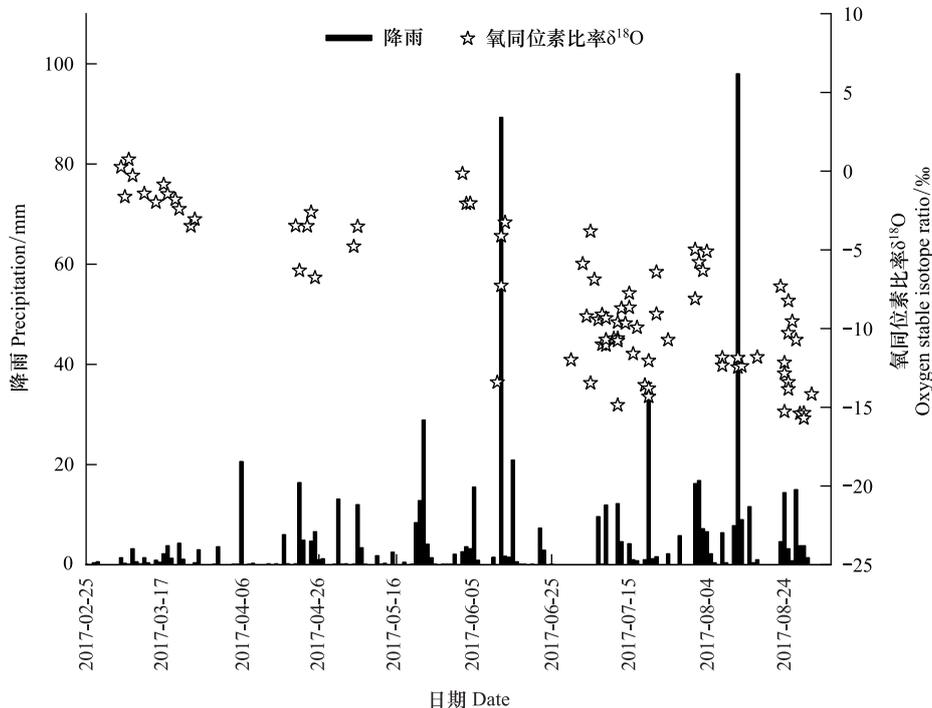


图2 研究期降雨量及雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of rainfall and $\delta^{18}\text{O}$ during the study period

素为 $-10.12‰ \pm 3.12‰$, 数据偏负, 表现为明显的季节变化。根据当地降水同位素, 线性拟合出当地大气降水线方程 $\delta^2\text{H} = 8.50 \delta^{18}\text{O} + 12.29$ ($R^2 = 0.97, P = 0.001$), 而全球大气降水线方程: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ 。从方程可以看出当地大气降水线方程在截距和斜率都高于全球大气降水线方程, 表明当地降水的蒸发富集现象并不明显。

2.2 植物水分来源定性分析

图 3 结果显示, 在春季采样时间(4 月 24 日—27 日)土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在表层土壤中最大, 并随着土壤深度(0—40 cm) 的增加而下降, 并且此时的泉水 $\delta^{18}\text{O}$ 值略高于 40 cm 土壤处 $\delta^{18}\text{O}$ 值。植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值中刺楸值最小, 同时香椿和化香的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相近, 表明当利用模型计算香椿和化香植物水分来源利用比例时各水源结果应该相近。图 3 表明在夏季采样时间内(7 月 8 日—10 日)土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在表层土壤中最小, 并且随着土壤深度(0—40 cm) 增加而增加, 与春季 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化规律相反, 并且此时的泉水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最高。植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值中香椿高于化香和刺楸, 且夏季香椿和化香的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相差比春季大, 表明当利用模型计算香椿和化香植物水分来源比例时各水源利用比例值存在一定差异。根据图中植物水 $\delta^{18}\text{O}$ 值所在的直线与不同源 $\delta^{18}\text{O}$ 值所在的线的交点所处的位置, 初步判断在春季香椿和化香主要利用 20 cm 土层土壤水分, 而刺楸主要利用 30 cm 土层土壤水分。在夏季, 香椿主要利用 40 cm 土层土壤水分, 而化香主要利用 30 cm 土层土壤水分, 刺楸主要利用 10 cm 土层土壤水分。

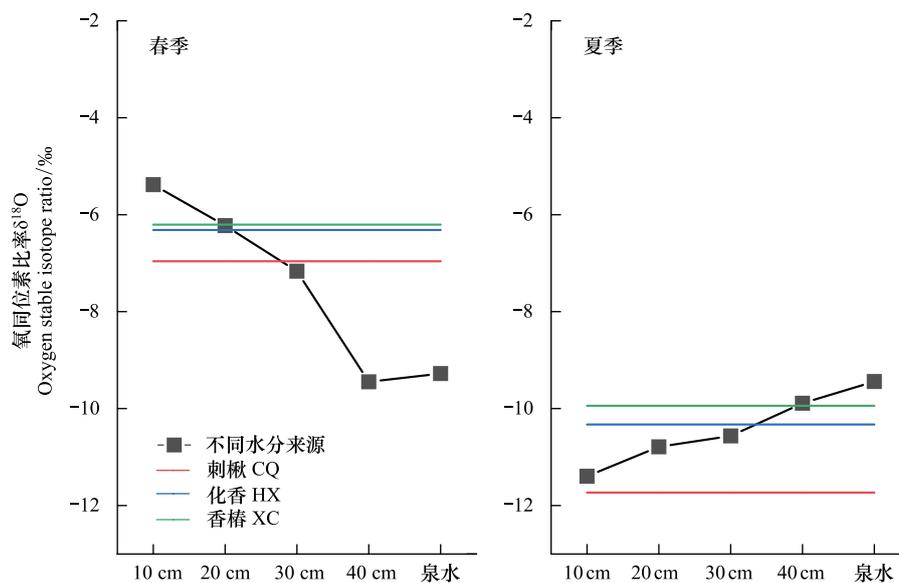


图 3 春夏季 CQ、HX、XC 和不同水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征

Fig.3 Variation characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ among CQ, HX, XC and different water sources in spring and summer seasons

CQ: 刺楸 *Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz.; HX: 化香 *Platycarya strobilacea* Sieb. et Zucc.; XC: 香椿 *Toona sinensis*

2.3 基于 MixSIAR 和 IsoSource 模型对植物水分来源定量分析

直接相关法只能判断植物水分的大致来源, 然而确定植物对各个水源的吸收比例在实际应用中更重要, 运用 MixSIAR 和 IsoSource 模型来分析植物对不同土层土壤水(10、20、30、40 cm) 和泉水的利用比例, 计算结果存在一定差异。

图 4 结果显示, 在春季, 利用 MixSIAR 模型对植物水分来源分析结果表明, 香椿对 10、20、30、40 cm 土层土壤水和泉水的利用比例分别是 27%、25%、21%、13%、14% 与化香的结果(27%、28%、22%、11%、12%) 相近, 这与直接相关法定性判断结果相近。然而利用 IsoSource 模型对植物水分来源分析显示, 香椿对 10、20、30、40 cm 土层土壤水和泉水的利用比例分别是 28%、27%、10%、21%、13% 与化香的结果(23%、25%、25%、13%、14%) 存在较大差异, 这个结果与直接相关法分析的结果差别较大。MixSIAR 模型的计算表明刺楸主要利用

10—30 cm 土层土壤水,与直接相关法分析的结果相近。直接相关法分析表明刺楸主要利用 20—30 cm 土层土壤水并且对 10—30 cm 土层土壤水的利用比例大于对 40 cm 土层土壤水和泉水的利用比例。而 IsoSource 模型计算结果表明刺楸主要利用 30—40 cm 土层土壤水和泉水,与直接相关法判断结果存在很大偏差。在夏季, MixSIAR 模型计算结果表明化香对 20、30、40 cm 土层土壤水的总利用比例为 58%, IsoSource 模型计算结果表明化香对 20、30、40 cm 土层土壤水总利用比例为 21%,而通过直接相关法显示化香对 20、30、40 cm 土层土壤水吸收比例高于 10 cm 土层土壤水和泉水,只有 MixSIAR 模型计算结果满足要求。因此 MixSIAR 模型计算结果比 IsoSource 模型计算结果可靠性要高。MixSIAR 模型计算结果表明香椿对 30、40 cm 土层土壤水和泉水总利用比例为 50%, IsoSource 模型计算结果表明香椿对 30、40 cm 土层土壤水和泉水总利用比例为 13%,而直接相关法分析表明香椿对 30、40 cm 土层土壤水和泉水水源吸收比例高于 10 cm 和 20 cm 土层土壤水,结果同样表明只有 MixSIAR 计算结果满足要求。MixSIAR 和 IsoSource 模型计算刺楸水分来源的结果表明:刺楸主要利用 10 cm 土层土壤水,利用比例分别为 59%和 96%,这与直接相关法得出的结果一致。

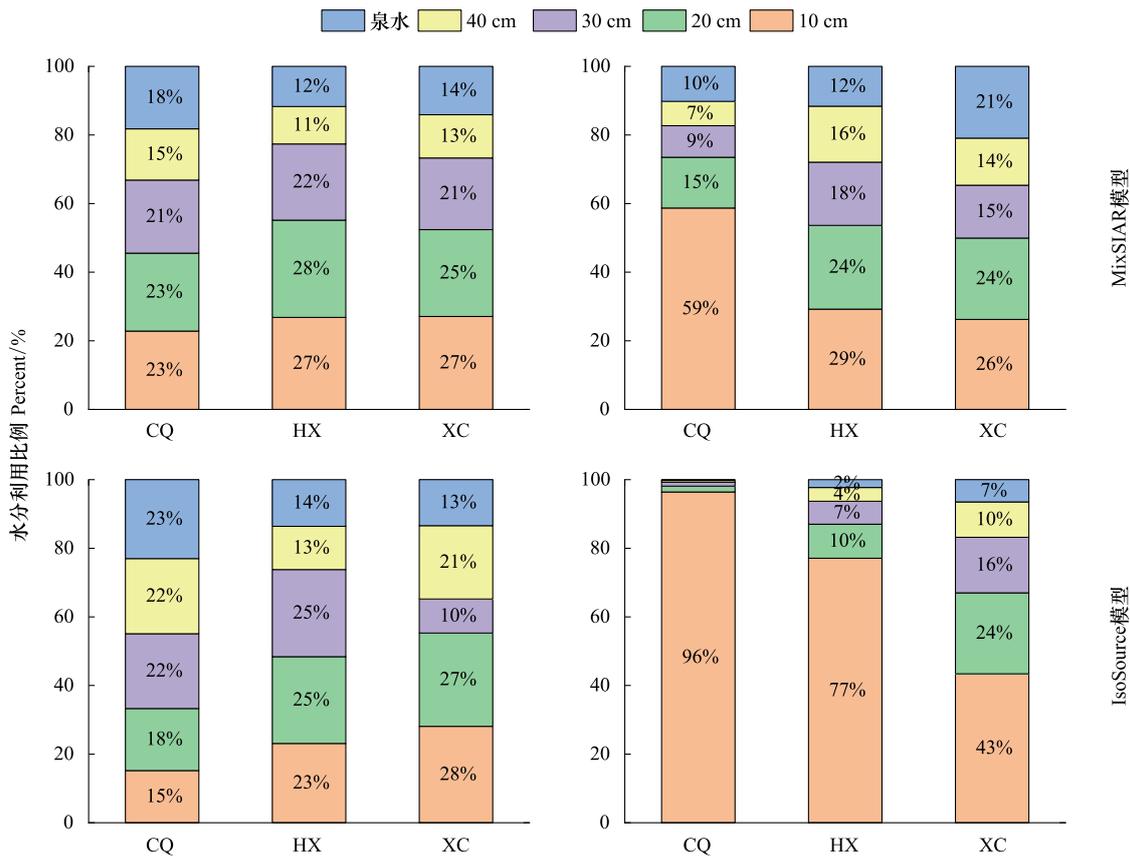


图 4 IsoSource 和 MixSIAR 模型计算植物水分来源比例结果

Fig.4 The results of the proportion of plant water source from IsoSource and MixSIAR models

图 a, b 分别是 MixSIAR 模型计算春夏季比例结果; 图 c, d 分别是 IsoSource 模型计算春夏季比例结果

2.4 模型的总体评价

图 5 显示在春季, MixSIAR 模型计算的 RMSE 值 0.61, 而 IsoSource 模型计算的 RMSE 是 0.84。在夏季 MixSIAR 模型计算的 RMSE 值是 0.59, 而 IsoSource 模型计算的 RMSE 是 0.74。上述结果表明, MixSIAR 模型计算结果的 RMSE 值小于 IsoSource 模型计算结果。因此利用 MixSIAR 模型计算植物水分来源结果误差小于 IsoSource 模型计算结果, 在喀斯特地区更适合利用 MixSIAR 模型解析植物水分来源。

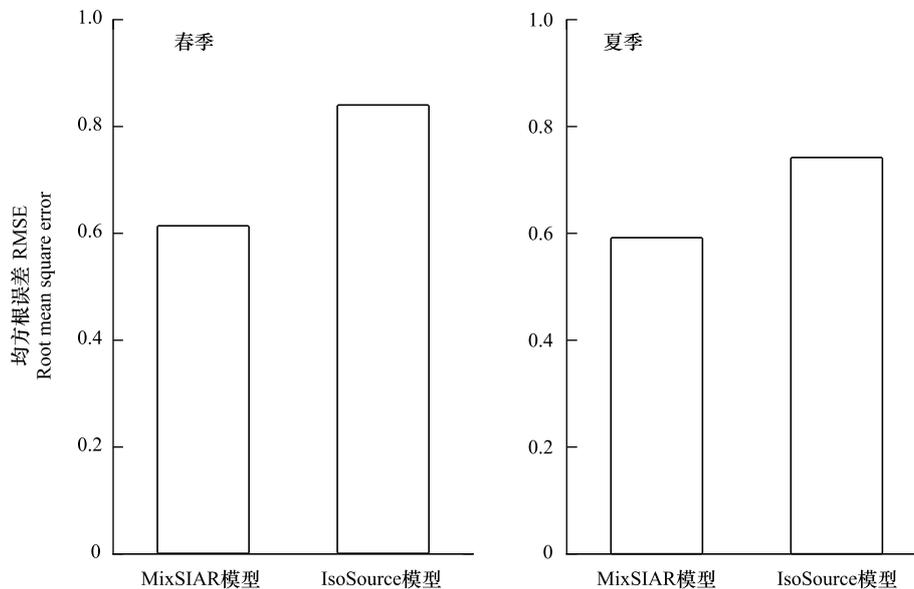


图5 MixSIAR 和 IsoSource 模型评价指标结果

Fig.5 The performance of plant water source by using MixSIAR and IsoSource models

3 讨论

MixSIAR 和 IsoSource 模型是量化植物水分来源比例的重要方法。本文研究结果显示这两种模型在量化植物水分来源上存在一定差异。以量化次生林刺楸、香椿和化香 3 种植物水分来源为例,借助直接相关法的分析结果,衡量哪种方法更适合解析喀斯特地区植物对不同水分来源的利用比例。在春季, MixSIAR 模型分析结果显示香椿和化香对不同的水分来源利用比例很接近,与直接相关法分析的结果相一致。而 IsoSource 模型计算结果显示香椿和化香对各水源的利用比例存在一定的差异,尤其是植物对 30—40 cm 土层土壤水利用存在很大的差异,然而直接相关法分析显示香椿、化香 $\delta^{18}\text{O}$ 值与水源线的交点相近,这表明,香椿和化香在对 30—40 cm 土层土壤水的利用比例应该相近而不应出现较大差异,这与 MixSIAR 模型计算的植水分来源结果较一致。同时 MixSIAR 模型计算刺楸植物水分来源结果显示刺楸主要利用 10—30 cm 土层土壤水,并对 10—30 cm 土层土壤水吸收大于泉水和 40 cm 土层土壤水,而 IsoSource 模型计算结果显示,刺楸主要吸收 30—40 cm 土层土壤水和泉水的水源。这两者的计算结果中植物的主要水源都有 30 cm 土层土壤水,与直接相关法分析结果近乎一致,但是刺楸 $\delta^{18}\text{O}$ 值对于 10—20 cm 土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值较 40 cm 土壤和泉水值更接近,因此刺楸应该对 10—20 cm 土壤水吸收高于 40 cm 和泉水,与 MixSIAR 模型计算出的结果一致,而与 IsoSource 模型计算结果存在较大差异。结果显示, MixSIAR 模型解析植物水分来源可靠性高于 IsoSource 模型。同时根据模型评价指标 RMSE 显示,在春夏季, MixSIAR 模型评价指标 RMSE 都小于 IsoSource 模型。因此, MixSIAR 模型对量化植物水分来源适用性高于 IsoSource 模型。

氢氧稳定同位素在植物(除少数耐盐和旱生植物外)吸水过程中并不发生分馏,同时各种水源氢氧稳定同位素值存在较大的差异^[13], 这为氢氧稳定同位素研究植物水分来源提供了理论基础^[31]。Phillips and Gregg^[18] 和 Phillips^[32] 基于质量守恒方程,利用线性混合模型得出当 $n+1$ 的水源能够被 n 个示踪元素精准的分析出。以一个稳定性同位素值和两个源为例,引入 f_A 和 f_B 作为利用 A、B 源的利用比例, δ_A 和 δ_B 为源同位素值, δ_M 为混合物同位素值,得出方程组: $\delta_M = f_A \delta_A + f_B \delta_B$, $1 = f_A + f_B$, 进而解析出方程中的 f_A 和 f_B 值。然而,准确计算混合物源的比例需要满足一定条件,只有当源的数量少于或者等于同位素数量+1 时,这些方程才能精准的解析出不同源的利用比例^[19]。同时,随机测量误差、同位素分馏都会导致这些比例估计值的不确定

性^[22]。然而, IsoSource 模型在实际应用的过程中源的数量往往都会高于同位素的数量+1,因此在利用上述方程求解时,方程将会呈现多解情况,方程的不确定增加,结果就会更加不可靠,同时也没有考虑到同位素在混合物与源之间的分馏,这样使得计算的结果更加不可靠。因此,导致本研究中利用 IsoSource 模型计算植物水分来源结果可靠性低于 MixSIAR 模型。

为了进一步提高解析混合物与源之间的准确度,解决 IsoSource 模型存在的问题,Moore and Semmens^[19]提出了基于 MATLAB 开发的 MixSIR 计算模型,该模型提出源对混合物贡献的概论分布,明确指出不确定性与源、分馏和同位素特征关系,同时在分析的过程中也可以加入先验信息。Parnell 等^[20]基于贝叶斯同位素混合模型,并进一步发布一个新的开源 R 包 SIAR。SIAR 与 MixSIR 模型有很大的相似处,然而 SIAR 模型包含残差而 MixSIR 模型没有。根据 SIAR 模型计算公式:

$$X_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K p_k q_{jk} (s_{jk} + c_{jk})}{\sum_{k=1}^K p_k q_{jk}} + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

式中, X_{ij} 是第 i 个混合物中同位素 j 的值, p_k 是由模型计算出第 k 个源对混合物的贡献率, q_{jk} 是第 k 个源中同位素 j 的浓度, s_{jk} 是第 k 个源中同位素 j 的值, c_{jk} 是第 k 个源中同位素 j 的分馏系数, ε_{ij} 是残差。当 SIAR 模型加入残差 ε_{ij} 后,能够降低模型的不确定,从而提高模型的准确性^[33]。MixSIAR 模型是基于 R 语言包并结合 MixSIR 和 SIAR 模型的优点所做的改进,通过考虑源值、分类和连续协变量和先验信息中的不确定性来改进更简单的线性混合模型,以提高模型结果的准确性。图 5 结果显示, MixSIAR 模型计算的 RMSE 值(春季 0.61, 夏季 0.59)低于 IsoSource 模型计算的 RMSE 值(春季 0.84, 夏季 0.74)证实了 MixSIAR 模型解析植物水分来源利用比例误差更小并且可靠性更高。然而,在喀斯特地区 IsoSource 模型被广泛运用于解析植物水分来源。丁亚丽等^[34]利用 IsoSource 模型研究尾巨桉水分利用特征, Nie 等^[35]利用 IsoSource 模型研究木本植物水分来源季节变化, Deng 等^[36]利用 IsoSource 模型研究青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 植物水分来源利用情况。在喀斯特地区很少有研究者利用 MixSIAR 模型解析植物水分来源, MixSIAR 模型多数被用于非喀斯地区,如杜俊杉等^[37]利用 MixSIAR 模型分析冬小麦植物水分来源, Ma and Song 等^[38]利用 MixSIAR 模型研究玉米水分来源季节变化。但本研究表明在喀斯特地区更适合利用 MixSIAR 模型解析植物水分来源。

4 结论

雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在明显的季节变化特征,在 3 月—6 月偏正,在 6 月—8 月数据偏负。在喀斯特地区利用 MixSIAR 和 IsoSource 模型解析植物对不同水源的利用比例结果存在差异。基于直接相关法结果显示, MixSIAR 模型计算植物水分来源优于 IsoSource 模型计算结果。基于 MixSIAR 和 IsoSource 模型计算结果总体评价的结果显示,在春夏季, MixSIAR 和 IsoSource 模型计算植物水分来源的 RMSE 值分别为 0.61 (0.59) 和 0.84 (0.74), 因此 MixSIAR 模型在计算植物水分来源时可靠性高于 IsoSource 模型。所以在喀斯特地区利用 MixSIAR 模型解析植物水分来源比 IsoSource 模型更适合。

参考文献 (References):

- [1] Liu M X, Xu X L, Sun A Y, Wang K L, Liu W, Zhang X Y. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes? *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 064002.
- [2] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. *生态学报*, 2008, 28(2): 811-820.
- [3] Dahlman R C, Kucera C L. Root productivity and turnover in native prairie. *Ecology*, 1965, 46(1/2): 84-89.
- [4] Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain. *Hydrological Processes*, 2004, 18(12): 2275-2287.
- [5] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林. 土层浅薄地区植物水分来源研究方法. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2427-2433.
- [6] Turner N C, Jones M M. Turgor maintenance by osmotic adjustment; a review and evaluation//Turner N C, Kramer P J, eds. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. New York: John Wiley & Sons, 1980: 87-103.

- [7] Asbjornsen H, Mora G, Helmers M J. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Midwestern U.S. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121(4): 343-356.
- [8] 邓文平, 余新晓, 贾国栋, 李亚军, 刘玉洁, 白艳婧. 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. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(3): 412-422.
- [9] 付青云, 刘廷玺, 段利民, 王冠丽, 曹文梅, 黄天宇. 基于稳定性氧同位素分析不同树龄小叶锦鸡儿用水策略. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1570-1579.
- [10] 李雪松, 贾德彬, 钱龙娇, 冯蕴. 基于同位素技术分析不同生长季节杨树水分利用. *生态学杂志*, 2018, 37(3): 840-846.
- [11] 张景文, 陈报章. 基于同位素分析研究山东禹城夏玉米水分来源. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 99-104.
- [12] Zhang Y C, Shen Y J, Sun H Y, Gates J B. Evapotranspiration and its partitioning in an irrigated winter wheat field: a combined isotopic and micrometeorologic approach. *Journal of Hydrology*, 2011, 408(3/4): 203-211.
- [13] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林, Susanne S. 采用稳定同位素技术判定喀斯特地区植物水分来源的挑战与可能应对方案. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2361-2368.
- [14] Brunel J P, Walker G R, Dighton J C, Monteny B. Use of stable isotopes of water to determine the origin of water used by the vegetation and to partition evapotranspiration. A case study from HAPEX-Sahel. *Journal of Hydrology*, 1997, 188-189: 466-481.
- [15] Dawson T E, Ehleringer J R. Isotopic enrichment of water in the "woody" tissues of plants: Implications for plant water source, water uptake, and other studies which use the stable isotopic composition of cellulose. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(14): 3487-3492.
- [16] Liu W J, Liu W Y, Li P J, Duan W P, Li H M. Dry season water uptake by two dominant canopy tree species in a tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna, SW China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(3): 380-388.
- [17] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, Yang J. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in karst region of Southwest China. *Journal of Hydrology*, 2012, 420-421: 264-274.
- [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] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, Jackson A L. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. *PLoS One*, 2010, 5(3): e9672.
- [21] Stock B C, Semmens B X. MixSIAR GUI user manual. Version 3.1. <https://github.com/brianstock/MixSIAR>.
- [22] Phillips D L, Gregg J W. Uncertainty in source partitioning using stable isotopes. *Oecologia*, 2001, 127(2): 171-179.
- [23] Evaristo J, McDonnell J J, Clemens J. Plant source water apportionment using stable isotopes: a comparison of simple linear, two - compartment mixing model approaches. *Hydrological Processes*, 2017, 31(21): 3750-3758.
- [24] Wang J, Lu N, Fu B J. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 685-693.
- [25] Zhao M, Zeng C, Liu Z H, Wang S J. Effect of different land use/land cover on karst hydrogeochemistry: a paired catchment study of Chenqi and Dengzhanhe, Puding, Guizhou, SW China. *Journal of Hydrology*, 2010, 388(1/2): 121-130.
- [26] Wang J X, Zou B P, Liu Y, Tang Y Q, Zhang X B, Yang P. Erosion-creep-collapse mechanism of underground soil loss for the karst rocky desertification in Chenqi village, Puding county, Guizhou, China. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2751-2764.
- [27] Dai Y, Zheng X J, Tang L S, Li Y. Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon* species in the Gurbantonggut Desert. *Plant and Soil*, 2015, 389(1/2): 73-87.
- [28] Gu D X, Zhang Z F, Mallik A, Zhou A P, Mo L, He C X, Huang Y Q. Seasonal water use strategy of *Cyclobalanopsis glauca* in a karst area of southern China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1007-1014.
- [29] 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.
- [30] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(9): 1073-1082.
- [31] Wang P, Song X F, Han D M, Zhang Y H, Liu X. A study of root water uptake of crops indicated by hydrogen and oxygen stable isotopes: a case in Shanxi Province, China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(3): 475-482.
- [32] Phillips D L. Mixing models in analyses of diet using multiple stable isotopes: a critique. *Oecologia*, 2001, 127(2): 166-170.
- [33] Jackson A L, Inger R, Bearhop S, Parnell A. Erroneous behaviour of MixSIR, a recently published Bayesian isotope mixing model: a discussion of Moore & Semmens (2008). *Ecology Letters*, 2009, 12(3): E1-E5.
- [34] 丁亚丽, 陈洪松, 聂云鹏, 王升, 张慧玲, 王克林. 基于稳定同位素的喀斯特坡地尾巨桉水分利用特征. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2729-2736.
- [35] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, Tan W, Deng P Y, Yang J. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolomite outcrops and nearby thin soils in subtropical China. *Plant and Soil*, 2011, 341(1/2): 399-412.
- [36] Deng Y, Kuo Y M, Jiang Z C, Qin X M, Jin Z J. Using stable isotopes to quantify water uptake by *Cyclobalanopsis glauca* in typical clusters of karst peaks in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1039-1046.
- [37] 杜俊杉, 马英, 胡晓农, 童菊秀, 张宝忠, 孙宁霞, 高光耀. 基于双稳定同位素和 MixSIAR 模型的冬小麦根系吸水来源研究. *生态学报*, 2018, 38(18): 6611-6622.
- [38] Ma Y, Song X F. Using stable isotopes to determine seasonal variations in water uptake of summer maize under different fertilization treatments. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 471-483.