

岩溶山地不同坡位植物水分来源和水分利用效率

吴虹余¹, 蒋勇军¹, 吴泽¹, 吕玉香², 罗淑娥¹,
张弦鸣¹, 李梦妮¹, 赵春峰¹, 吕同汝¹, 茆杨¹, 邱菊¹

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400700;

2. 重庆市地质矿产勘察开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 400700)

摘要: [目的] 研究岩溶坡地生境中不同坡位典型木本植物的水分利用效率, 为岩溶坡地合理的水土保持和生态修复措施提供指导。[方法] 利用气象数据、土壤质量含水率、稳定同位素($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) 数据, 研究了重庆明月山岩溶槽谷 3 个不同坡位样地的典型木本植物的水分来源和水分利用效率。[结果] ① 雨季土壤含水率高于旱季; 坡上的平均土壤含水率较坡中低 5.07%~28.41%, 较坡下低 16.36%~30.49%。② 表层岩溶带水是不同坡位上木本植物的重要水源, 雨季坡上、坡中和坡下的木本植物对其利用比例分别为 34.65%, 25.58% 和 20.82%, 旱季分别为 54.44%, 53.60% 和 43.47%。雨季, 坡中和坡下植物对 20—40 cm 土层土壤水分的利用比例高于坡上; 而旱季, 坡下植物对 20—40 cm 土层土壤水分的利用比例高于坡上。③ 乔木和灌木的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和内在水分利用效率(WUE_i) 在雨季均低于旱季。在不同坡位中, 乔木的 WUE_i 值均高于灌木, 乔木和灌木 WUE_i 的均值表现为: 坡上 > 坡中 > 坡下。[结论] 岩溶槽谷的土壤含水量从坡上到坡下递增。坡上植物面对水分胁迫时, 更多利用表层岩溶带水, 且水分利用效率更高。

关键词: 岩溶槽谷; 坡位; 水分来源; 水分利用效率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0019-10

中图分类号: S157, X173 S792.39

文献参数: 吴虹余, 蒋勇军, 吴泽, 等. 岩溶山地不同坡位植物水分来源和水分利用效率[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 19-28. Wu Hongyu, Jiang Yongjun, Wu Ze, et al. Water sources and water use efficiency of plants at different slopes in karst mountainous areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 19-28. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.040; CSTR:32312.14.stbctb.2025.04.040.

Water sources and water use efficiency of plants at different slopes in karst mountainous areas

Wu Hongyu¹, Jiang Yongjun¹, Wu Ze¹, Lü Yuxiang², Luo Shue¹,
Zhang Xianming¹, Li Mengni¹, Zhao Chunfeng¹, Lü Tongru¹, Mao Yang¹, Qiu Ju¹
(1. School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400700,
China; 2. Nanjiang Hydrogeological Engineering Geological Team, Chongqing
Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Chongqing 400700, China)

Abstract: [Objective] The water use efficiency of typical woody plants at different slope positions in karst slope habitats were analyzed in order to provide guidance for formulating effective soil and water conservation and ecological restoration measures for karst slopes. [Methods] Using meteorological data, soil mass moisture content, and stable isotope ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) data, the water sources and water use efficiency of typical woody plants in three different slope plots in the karst trough valley of Mingyue Mountain, Chongqing were studied. [Results] ① Soil moisture content was higher during the rainy season than during the dry season. In terms of slope position, the average soil moisture content on the upper slope was lower than that on the middle slope, with a difference ranging from 5.07% to 28.41%, and approximately 16.36% to 30.49% lower than that on the lower

收稿日期: 2025-02-08

修回日期: 2025-05-23

采用日期: 2025-05-23

资助项目: 西南大学创新研究 2035 先导计划“岩溶槽谷区水土流失/石漠化过程及植物适应性机理”(SWU-XDZD22003); 西南大学试验技术研究项目(SYJ2025016); 重庆市自然科学基金项目(2022yszx-jcx0008cstb, cstb2023yszx-jcx0009)

第一作者: 吴虹余(1996—), 女(汉族), 广东省湛江市人, 硕士研究生, 研究方向为碳循环与岩溶作用。Email: hongyuwuu@qq.com。

通信作者: 蒋勇军(1968—), 男(汉族), 湖南省安化市人, 博士, 教授, 主要从事岩溶环境/水文地质、水文学、(生物)地球化学、全球变化及 GIS 等方面的研究。Email: Jiangyj@swu.edu.cn。

slope. ② Water from the surface karst zone serves as a critical water source for woody plants at different slope locations. The utilization rates were 34.65%, 25.58% and 20.82% for the upper, middle and lower slopes respectively, during the rainy season, and increased to 54.44%, 53.60% and 43.47% respectively, during the dry season. During the rainy season, the utilization ratio of soil moisture by plants in the 20—40 cm soil layer on the middle and lower slopes was higher than that on the upper slopes. During the dry season, the proportion of soil moisture utilized by plants in the 20—40 cm soil layer on the lower slopes was higher than that on the upper slopes. ③ The $\delta^{13}\text{C}$ values and intrinsic water use efficiency (WUE_i) of trees and shrubs were lower during the rainy season than during the dry season. Across different slope positions, the WUE_i of trees was higher than that of shrubs, with the mean WUE_i following the order: upper slope > middle slope > lower slope. [Conclusion] Owing to differences in slope position, the soil moisture content in the karst trough valley increases from the top to the bottom of the slope. When plants on slopes are exposed to water stress, they make greater use of the water in the surface karst zone and exhibit higher water use efficiency.

Keywords: karst trough valley; slope location; water sources; water use efficiency

水是驱动岩溶关键带物质循环和能量流动的主要传输媒介,也是维持植物生长的关键因子^[1]。在全球气候变化下,西南岩溶地区受干旱影响愈发频繁,因其属亚热带季风气候,易发生季节性干旱^[2]。干旱不仅使土壤水分缺失,还在短期内快速对岩溶地下水系统产生影响,扩大气象干旱给岩溶生态系统带来的影响^[3-4]。而地形差异会对水资源进行再分配^[5],岩溶槽谷两侧多为斜坡,雨水一部分沿坡面土壤层流向坡底,另一部分沿表层岩溶带管道裂隙垂直下渗至地下径流区,坡底土壤水分高于坡上^[6]。由于坡地不同坡位的植物生长受到的干旱胁迫程度不同,植物会通过改变叶片气孔导度以及调整水分利用效率等方式来适应水分胁迫环境^[7]。举例而言,蒋丹丹等^[8]的研究发现底坡处侧柏的水分利用效率最高;Liu Wenna等^[9]指出,不同坡位间植物的水分来源差异较小,植物以吸收土壤水分为主。但坡位差异会影响植物的蒸腾速率和蒸腾量,尤其是坡上植物为适应水分胁迫而降低自身的蒸腾速率和蒸腾量^[9]。因此,研究岩溶坡地木本植物的水分利用策略分异可为岩溶区进行针对性的生态保护和修复提供科学依据。

目前对岩溶槽谷地区的研究主要集中在植物生存环境差异对其水分利用策略的影响。例如,吕同汝^[10]针对顺层坡与逆层坡两种不同地形条件下适生树种(女贞、刺槐和马尾松)水分利用策略差异进行研究^[10];Wu Ze等^[11]认为在旱季女贞主要利用深层水源,提高内在水分利用效率(WUE_i),并降低蒸腾速率。Liu Jiuchan等^[12]、Cao Min等^[13]和Wu Ze等^[14]研究发现,隧道开挖引起的水分胁迫促使木本植物通过气孔控制调节蒸腾作用、碳吸收和碳同化作用,促使植物采取保守的水分利用策略^[11-13]。但对于岩溶槽谷不同坡位的木本植物如何应对季节性干旱,

相关研究仍较少。因此,有必要针对岩溶槽谷不同坡位木本植物的水分来源和水分利用效率展开深入研究,以便了解该地区不同坡位木本植物在不同季节下,其水分来源和水分利用效率的波动特征,以及它们对周边环境因子的响应差异。

岩溶地区植物水分利用来源的辨识常通过 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素技术手段和同位素混合模型进行^[9-11,13],除少数耐盐碱和干旱地带植物外^[15],植物根系吸收的水分在到达未栓化树枝之前不会发生同位素分馏^[16]。基于R语言的SIMMR包SIAR软件包的升级,贝叶斯混合模型SIMMR与线性模型(IsoSource)以及贝叶斯模型(SIAR, MixSIAR)相比,其包含了不确定性、浓度依赖及大量来源分析,具备更复杂的模型功能^[17]。比如,Zhao等运用SIMMR模型计算了毛乌素沙漠六道沟流域共存植物的水分来源,并指出该模型能够通过整合稳定同位素、有效土壤水分以及根重密度数据,有效地解析干旱区植物的水分利用策略^[18]。

对于植物叶片碳同位素识别($\Delta^{13}\text{C}$),主要取决于细胞间和环境 CO_2 浓度的比值(C_i/C_a),而该值受气孔导度(g_s)和光合速率(A)的调节^[19],植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 WUE_i 紧密联系。植物叶片 WUE_i 值作为一项关键指标,常被用于指示植物对碳的吸收能力以及水分利用状况^[10,13-14]。因此,本研究通过不同季节对岩溶坡地不同坡位木本植物、土壤、表层岩溶泉及地下水进行采样,测定土壤含水率,借助稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)和SIMMR模型,分析木本植物水分来源和水分利用效率的时空分异特征,探究坡位对典型木本植物水分利用策略的影响机制,便于深入理解植物与坡位水资源与环境的相互作用关系,为岩溶坡地制定合理的水土保持和生态修复措施提供指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概 况

明月山岩溶槽谷(106°48'52"—106°59'06"E, 29°38'52"—29°54'47"N)位于重庆东北部明月山背斜地区,高程为380~500 m,总面积约53.6 km²。该地区为亚热带季风气候区,年均温度18℃,年均降水量1100 mm,其中约80%的降水集中于雨季(4—10月)。岩溶槽谷在水平方向上,北部地表分水岭(海拔600~850 m)形成明月山岩溶槽谷的补给边界,南部御临河(海拔180~200 m)为排泄边界。东西两侧为三叠系上统须家河组(T₃xj)的砂岩和页岩构成隔水边界。垂向上,三叠系下统飞仙关组(T₁f)泥岩为隔水底板,三叠系下统嘉陵江组(T₁j)、三叠系中统雷口坡组(T₁l)灰岩、白云岩、泥质灰岩为含水层,厚度480~500 m。采样地主要位于三叠系下统嘉陵江组(T₁j)灰岩地区。槽谷内碳酸盐岩厚度大、分布广、纯度高,雨水和地表水通过落水洞、裂隙或竖井迅速进入岩溶含水层,最终以岩溶泉或地下河的形式排出。

研究区典型植物有女贞(*Ligustrum lucidum*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)和黄荆(*Vitex negundo*)等。研究区布设3个研究点,从周边表层岩溶泉收集样品,并同时采集数据。本研究根据坡面高度进行区分,共为坡上、坡中和坡下3个乔灌木林地,其中,坡上样地与岩溶槽谷地表平地的相对高差为36.7 m,坡中与岩溶槽谷地表平地的相对高差为23.2 m,坡下与岩溶槽谷地表平地的相对高差为4.1 m。在不同坡位布设植物和土壤水分定位监测点,按照季度采集植物和土壤样品,并收集表层岩溶泉样品。

1.2 样品和数据收集

2021年7月至2022年6月利用自动气象监测站(DAVIS, Vantage PM2型,天津气象仪器公司)对气温(℃)和降水量(mm)等气象要素进行观测。在此期间,每个季度选一个晴天(此前三天无雨)进行植物木质部、土壤及表层岩溶泉水样品采集。用高枝剪在监测样树树冠各方位采集栓化枝条,木质部样品用剪刀切割成小段并迅速去皮装入50 ml聚乙烯棕色瓶,瓶子用parafilm封口膜密封,同时,用环刀采集植物周边土壤表层以下0—20 cm和20—40 cm深度的土壤,土壤样品分为2份,一份装入50 ml聚乙烯棕色瓶用于土壤水抽提,另一份用烘干法测定土壤质量含水率。每份土壤样品取3个重复样测定结果的平均值。采集的植物和土壤样品放置-4℃冰盒保

存,返回实验室后放置在一20℃冰箱中冷冻保存。表层岩溶带水无法直接获取,为了解决这一问题,在采样地周边采集泉水与钻孔水分以及地下河出口处的水分,装入小瓶并密封保存于冰箱,后期用于测试 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。研究中发现这些水分数值相似,同时McCole^[20]等也提出泉水同位素含量可代替表层岩溶带水的氢氧同位素含量,因此用监测树周围的泉水来替代。土壤和植物木质部样品在西南大学地理科学学院水同位素实验室运用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2100, LICA, Beijing, China)完成抽提(抽提效率在99%以上)。以上所获得的大气降水、木质部水、土壤水、表层岩溶带水的测试均在西南大学(重庆国家紫色土土壤肥力与肥料效益监测基地)完成,运用液态水稳定性同位素仪(LWIA; GLA431-TLWIA(912-0050)和Los Gatos Research, USA)进行分析, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析误差分别为 $\pm 0.50\text{‰}$ 和 $\pm 0.20\text{‰}$ 。此外,采集各个样树健康、成熟无病虫害的叶片,当天使用纯水清洗干净,烘干至恒重后,研磨过100目筛,通过元素分析仪和同位素比值质谱仪(EA-IRMS)测定叶片碳同位素,测试精度为 $\pm 0.20\text{‰}$ 。

1.3 数据处理与分析

将土壤放置于105℃烘箱中烘干至恒重,土壤质量含水率(SMC,%)计算公式为^[10,14]:

$$\text{SMC} = \frac{\text{Wet weight} - \text{Dry weight}}{\text{Dry weight}} \quad (1)$$

氢氧同位素比率($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$,‰)计算公式为^[10,14]:

$$\delta^2\text{H} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (2)$$

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{R_{\text{sample}} - 1}{R_{\text{standard}}} \right) \times 1000 \quad (3)$$

式中: R_{sample} 和 R_{standard} 分别为样品和标准水样(Vienna Standard Mean Ocean Water)的 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析误差分别为 $\pm 0.50\text{‰}$ 和 $\pm 0.20\text{‰}$ 。

SIMMR模型是基于SIAR模型基础上优化升级更加复杂模型(<https://cran.r-project.org/web/packages/simmr/vignettes/simmr.html>),其中包含了不确定性、浓度依赖及大量来源分析等,但只能对同一生态系统的食物来源贡献进行分析^[17]。将植物木质部水分同位素 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 作为混合数据输入SIMMR模型,并将不同深度土壤水分和表层岩溶泉水同位素 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的均值和标准误差作为源数据输入SIMMR模型中计算并得出相应的结果,混合数据和源数据没有浓度依赖性。由于植物在吸水过程中没有发生同位素分馏, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数值浓度依赖数

据设置为零^[21]。SIMMR 模型基于使用贝叶斯概率,遵循如下质量守恒方程^[22]:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{jk} + e_{ij} \quad (4)$$

式中: X_{ij} 为第*i*个样品的第*j*个同位素的值; p 为潜在来源数量(k); f_{jk} 为第*k*个来源的第*j*个同位素组成; g_{ik} 为第*k*个来源第*i*个样品的贡献百分比数值; e_{ij} 为误差比率。

SIMMR 模型基于马尔可夫链-蒙特卡洛方法 MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 构建多条 Markov 链从而确定后验分布,本研究 MCMC 运行参数设置分别为 iter=50 000, burn=1 000, thin=10, n. chain=4。SIMMR 模型采用 Gelman-Rubin 诊断 Markov Chain 的收敛程度,当 Gelman-Rubin 诊断结果小于 1.1 时,可以认为 SIMMR 模型构建的 Markov 链是收敛的,结果越接近 1 越有可能代表真实的、潜在的后验分布^[21]。本研究所构建的 Markov 链足够收敛,模型收敛性指标 R-hat 均小于 1.10,模型参数估计收敛且可靠。针对有限的样本量, SIMMR 混合模型可以将有限数据样本同默认通用先验分布整合,对原始数据进行 1 000 次拟合,最终通过计算得到基于来源数据的数据分布,增加数据分析的精度,并且通过后验分布分析和使用 95% 置信区间来估计植物水分来源贡献比例的不确定性。

根据叶片¹³C/¹²C 比率计算光合¹³C 比率($\Delta^{13}C$)^[10,14]:

$$\Delta^{13}C = \frac{\delta^{13}C_a - \delta^{13}C_p}{1 - \frac{\delta^{13}C_p}{1000}} \quad (5)$$

式中: $\delta^{13}C_a$ 和 $\delta^{13}C_p$ 分别为周围空气中 CO_2 (假定为 -8%)和植物叶片碳同位素比率。

根据 C_3 植物光合同位素的叶尺度模型,运用植物平均 $\Delta^{13}C$ 估算其内在水分利用效率(WUE_i)^[10,14]:

$$WUE_i = \frac{c_a(b - \Delta^{13}C)}{1.6 \times (b - a)} \quad (6)$$

式中: C_a 为周围空气的 CO_2 浓度; a 是通过气孔扩散的 $^{13}CO_2$ 分馏(4.4%); b 是 CO_2 羧化过程中的同位素分馏(27%)^[23]。

在采用 SPSS 23.0 软件在对土壤质量含水率、氢氧同位素和碳同位素等数据进行正态分布和方差齐性检验的基础上,采用 one-way ANOVA 对其进行方差分析,使用 Origin 2018 软件完成制图。

2 结果与分析

2.1 气象因子和土壤含水量的变化特征

研究期间(2021年7月至2022年6月)总降水量为 935.8 mm,降水主要发生在雨季(4—10月),雨季

降水量占年降水量的 93.23%,而旱季降水稀少(11月至次年3月),旱季降水量占全年降雨量的 6.77%(图 1)。不同坡位土壤质量含水率均值受降水时间动态变化的影响,雨季较高,为 29.74%,旱季较低,为 27.23%。坡上 20—40 cm 土壤水分(24.65%)比 0—20 cm 土壤水分(23.69%)高,而坡中和坡下则相反。整体上,0—20 cm 土壤水分变化波动较 20—40 cm 略大,二者波动范围分别为 16.14%~41.08% 和 18.17%~39.30%。同时,3 个坡位不同土层土壤质量含水率存在差异($p < 0.05$),坡上土壤水分含量(24.17%)低于坡中(29.34%)和坡下(31.95%)。

2.2 大气降水和不同坡位土壤水、木本植物木质部水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值季节变化

2.2.1 大气降水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值季节变化

研究期间(2021年7月至2022年6月)降水的 δ^2H , $\delta^{18}O$ 值表现出一定的季节变化特征,呈现出旱季偏正、雨季偏负的特征。其中,降水的 δ^2H 值范围为 4.35%~ -132.05% ,平均值为 -45.8% , $\delta^{18}O$ 值范围为 -1.30% ~ -17.73% ,平均值为 -7.9% 。

2.2.2 不同坡位土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的变化

在 3 个不同坡位中,土壤水的同位素组成随季节和土层深度的变化而变化(图 2)。不同坡位旱季土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值均低于雨季,同时不同季节不同坡位土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值都存在差异。其中,雨季坡上、坡中和坡下土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 -38.60% , -40.08% , -42.78% 和 -6.54% , -6.61% , -7.05% ;旱季坡上、坡中和坡下土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 -43.54% , -43.31% , -52.01% 和 -7.24% , -7.03% , -8.35% 。不同坡位 0—20 cm 土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值均大于 20—40 cm 土壤水,这可能是因为 0—20 cm 土壤水受到蒸发效应影响,发生同位素分馏,富集相对较重的同位素。特别是在旱季期间,不同深度土壤水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值差异更为显著($p < 0.05$)。

在 3 个坡位中,表层岩溶带水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值在旱季略高于雨季,但与土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值的季节变化相比,不同坡位表层岩溶带水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值的季节性变化小。

2.2.3 不同坡位植物木质部水分同位素组成的变化

一年中,不同坡位植物木质部水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值存在显著的季节差异($p < 0.01$),整体上旱季植物木质部水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值较雨季富集且变化范围较小。与坡上与坡下相比,坡中植物木质部水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值偏负。同时,雨季植物木质部水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值更趋向于土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值变化趋势,表明植物木

质部水对土壤水的变化更为敏感,即植物会优先利用土壤水。而旱季植物木质部水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值更趋

向于表层岩溶带水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化趋势,表明植物转向利用表层岩溶带水。

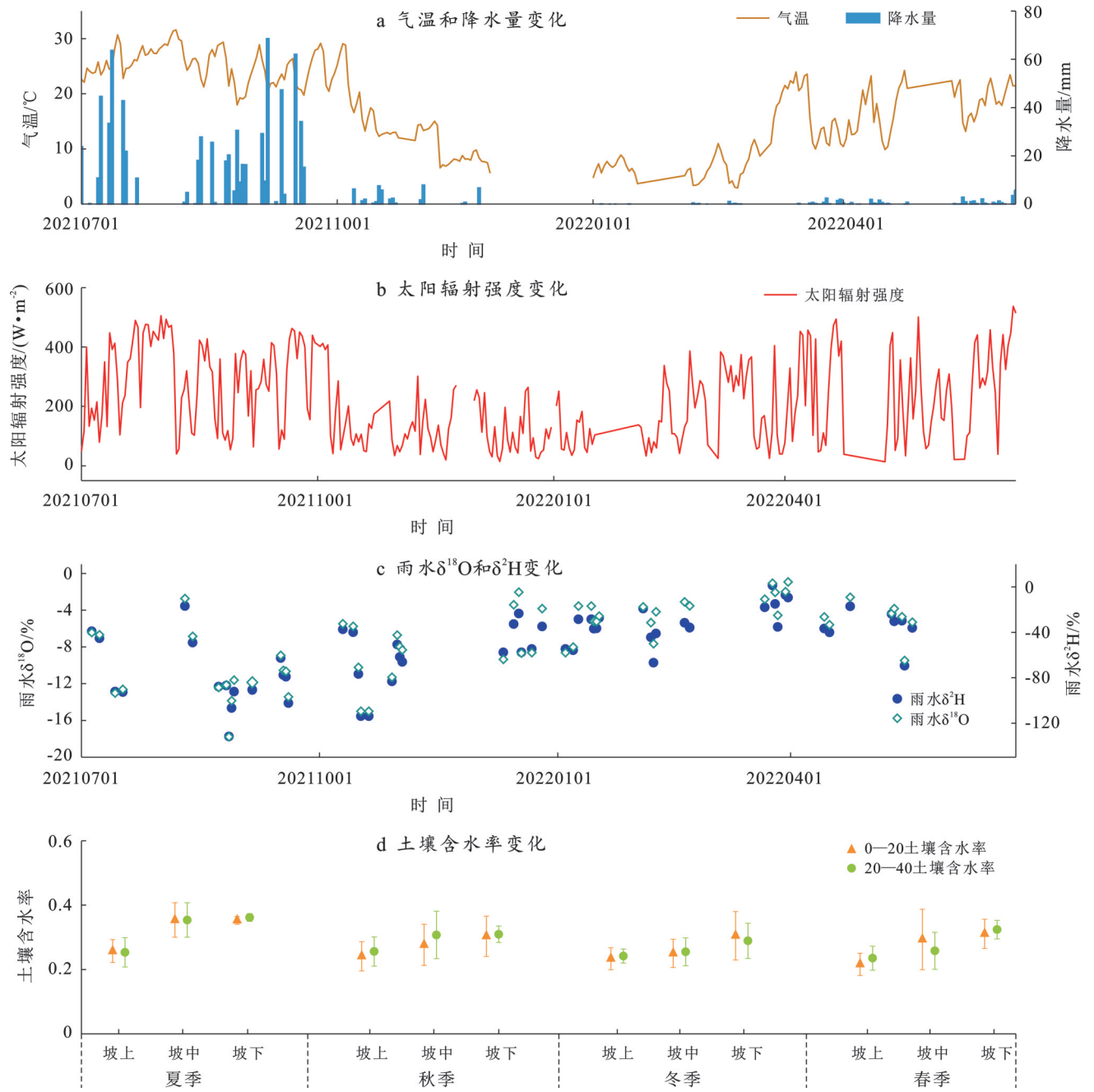


图 1 研究区气象环境因素的季节差异

Fig.1 Seasonal differences of study area in meteorological environmental factors

2.3 不同坡位木本植物水分来源利用的季节变化

通过 SIMMR 模型对不同坡位典型乔木和灌木对潜在水源的利用比例进行定量分析,得出不同水源对植物的贡献情况(图 3)。不同坡地不同植被类型的水分来源对季节响应明显,季节变化间水分贡献率差异较大($p < 0.05$)。雨季坡上植物对表层岩溶带水源利用比例偏高于坡中和坡下,但是坡中和坡下植物对 20—40 cm 处土壤水分利用比例高于坡上。

旱季期间表层岩溶带水是 3 个坡位植物主要利用的水源,坡中和坡下植物对 0—20 cm 处土壤水分利用比例高于坡上。通过不同季节植物水分利用比例可知,雨季期间不同坡位植物对不同来源水分利用比例差异更加显著,表明雨季期间坡位对植物水分利用影响更大。此外,旱季坡上乔木和灌木对表层岩溶带水的利用比例较雨季分别提高 85.03% 和 33.55%,而坡中和坡下的分别提高 106.79% 与

112.78% 和 91.95% 与 130.17%。由此可知,坡中和坡下植物通过调整其水源利用比例来响应不同季节土壤水分变化,显示出更强的水分利用可塑性。相

比之下,坡上植物通过稳定利用表层岩溶带水适应长期土壤水分相对较少的环境,表现出更为保守的水分利用策略。

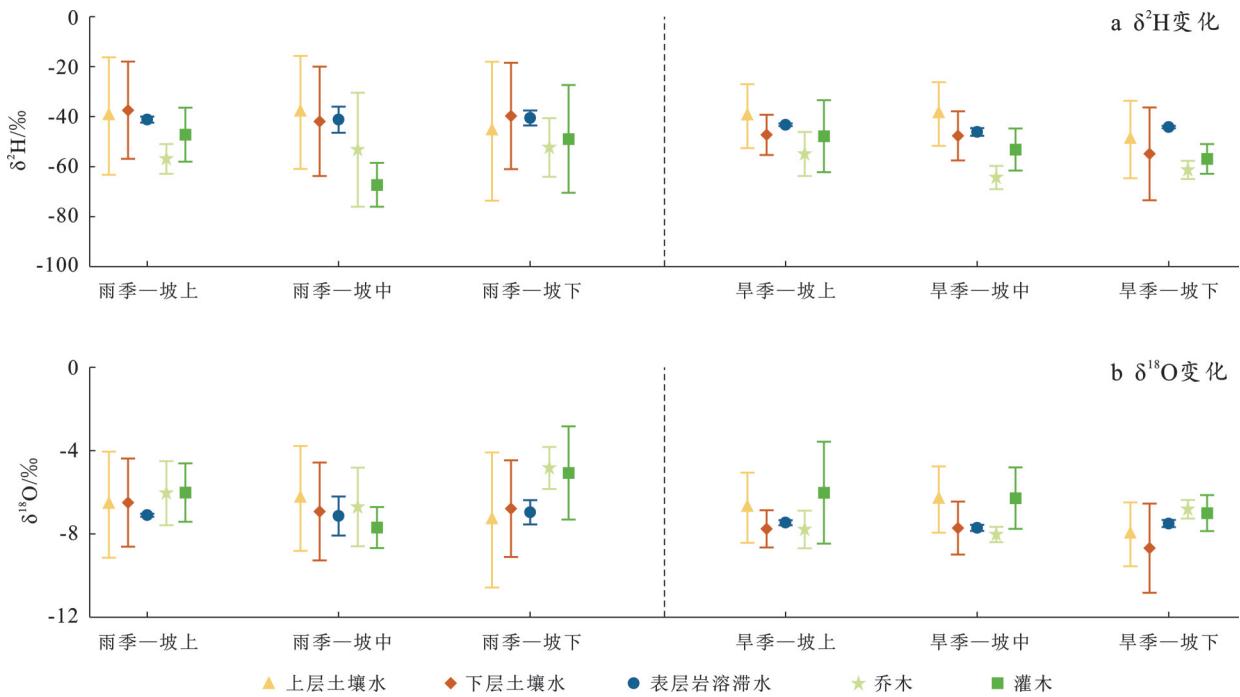


图2 岩溶槽谷不同坡位植物木质部、土壤水和表层岩溶带水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值季节变化
 Fig.2 Seasonal changes of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of plant xylem, soil water and surface karst zone water at different slope positions in karst trough valley

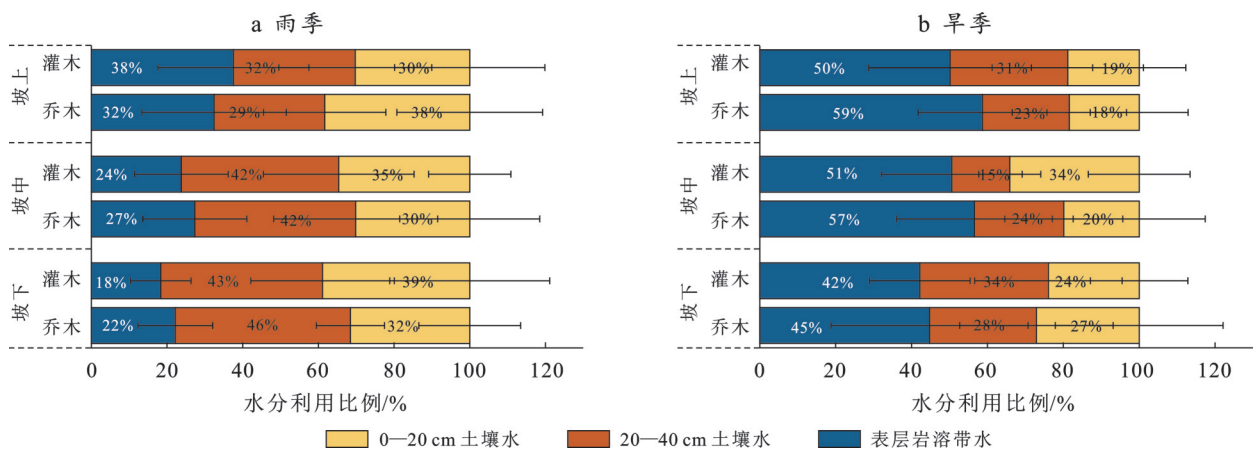


图3 基于SIMMR模型的不同坡位植物在不同季节对0—20, 20—40 cm处土壤水和表层岩溶带水的利用比例
 Fig.3 Utilization ratio of soil water at 0—20 cm, 20—40 cm and surface karst zone water by plants in different slope locations in different seasons based on SIMMR model

2.4 不同坡位木本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE_i 的季节变化以及 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE_i 与土壤含水量的关系

图4表明,不同坡位乔木和灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -32.7‰ ~ -28.2‰ , 均值为 -30.3‰ , 均为 C3 植物。在不同季节中,旱季不同坡位叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均高于雨季 ($p < 0.05$)。雨季,不同坡位植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -32.03‰ ~ -28.18‰ , 均值为 -30.41‰ ;旱季,不同坡位植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -32.72‰ ~ -28.42‰ ,

均值为 -30.26‰ 。乔木叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值高于灌木,雨季,不同坡位仅乔木的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异 ($p < 0.05$),而整体上乔木 $\delta^{13}\text{C}$ 均值表现为坡上大于坡中与坡下,灌木 $\delta^{13}\text{C}$ 均值表现为坡上和坡下的相对较小。

不同坡位乔木和灌木叶片 WUE_i 在不同季节具有显著差异 ($p < 0.05$),表现为雨季乔木和灌木的 WUE_i 低于旱季。其中,雨季期间不同坡位植物

WUE_i变化范围为81.97~132.62 μmol/mol,均值为102.47 μmol/mol;旱季期间不同坡位植物WUE_i变化范围为109.89~184.41 μmol/mol,均值为153.19 μmol/mol。无论是雨季还是旱季,不同坡位乔木WUE_i存在显著差异($p < 0.05$),而不同坡位灌木WUE_i差异则不显著,这一结果说明乔木对坡位变化

的响应更加敏感。

在不同季节中,3个坡位植物WUE_i表现为坡上>坡中>坡下,乔木WUE_i略高于灌木。以上结果表明,在不同季节,坡位土壤水分差异受到生态环境要素季节变化影响,进而影响不同坡位植物δ¹³C值与水分利用效率。

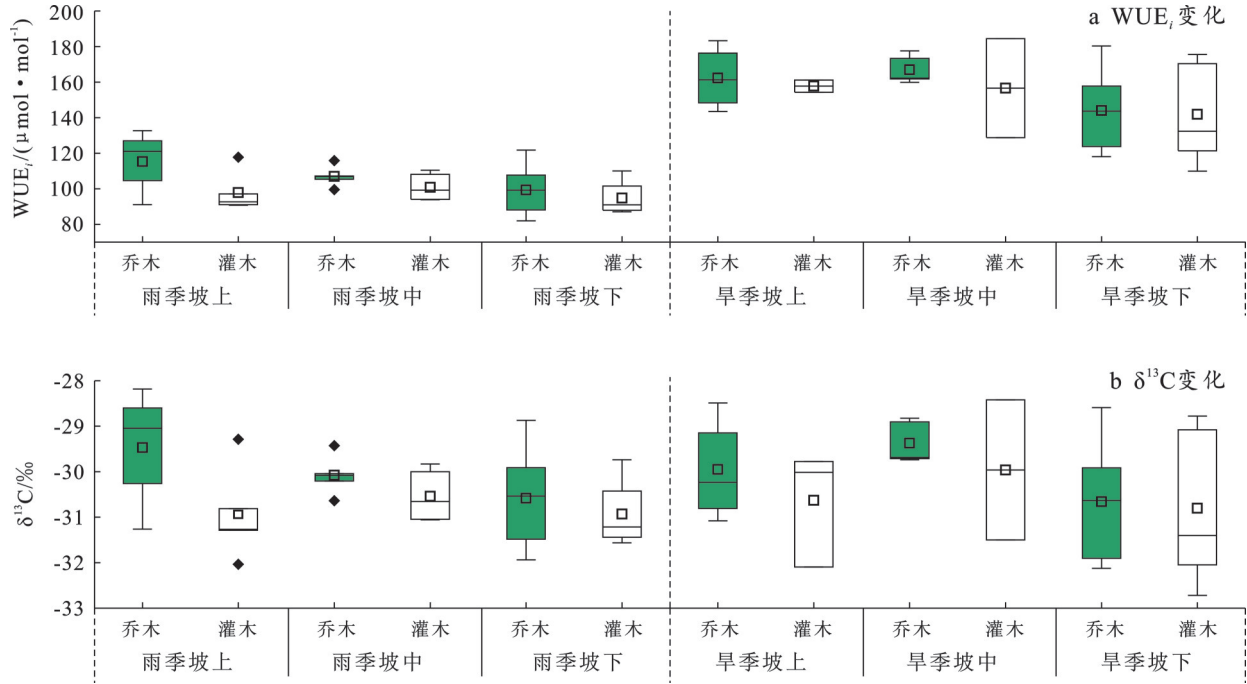


图4 不同坡位植物在不同季节δ¹³C值和WUE_i的变化特征

Fig.4 Variation characteristics of δ¹³C values and WUE_i of plants in different slope locations in different seasons

不同坡位乔木和灌木δ¹³C值和WUE_i均呈现出负相关趋势,其随土壤含水量增加而降低,表明不同坡位植物δ¹³C值和WUE_i受到土壤含水量影响较大

(表1)。其中,与坡上和坡中对比,坡下乔木和灌木δ¹³C值和WUE_i与土壤含水量的相关性较高,表明坡下植物对土壤水分含量变化更加敏感。

表1 不同坡位乔、灌木植物δ¹³C值和WUE_i与土壤含水量相关系数
Table1 Correlation coefficient between δ¹³C values and WUE_i of trees, shrubs and soil water content in different slope positions

树种	坡上		坡中		坡下	
	δ ¹³ C	WUE _i	δ ¹³ C	WUE _i	δ ¹³ C	WUE _i
乔木	-0.724*	-0.818*	-0.782*	-0.615	-0.722*	-0.830*
灌木	-0.784*	-0.792*	-0.587	-0.970**	-0.871*	-0.786*
全部树种	-0.378	-0.586*	-0.689**	-0.185	-0.809**	-0.749**

注:*表示p<0.05差异显著;**表示p<0.01差异显著。

3 讨论

3.1 不同坡位土壤质量含水率的差异

在不同季节,不同坡位的土壤质量含水率差异显著($p < 0.05$),表明地形位置差异对土壤含水率有重要影响。研究区槽谷山地主要为石灰岩,土壤浅薄且裂隙多^[2,5-6],山地坡面浅层土壤的持水能力较

低,降雨后坡上土壤层水分垂直下渗较快,Fu等也指出岩溶坡面约15%~45%的降雨会下渗至地下^[24]。降雨是岩溶槽谷坡面产流的主要来源^[25],坡面其余部分降雨是则在坡中以壤中流和坡面超渗产流流向坡下^[6],坡上土壤水分低于坡中和坡下。坡面上植物的活根和腐烂根所占据的空间位置是土壤层大孔隙形成的重要方式,也是优先流的重要通道^[26],优先流

量强烈影响水分的渗透能力^[6],加剧水分往坡下运移,造成坡上水分偏少。但由于坡中和坡下位置长期易于受到坡上的水土沉积,导致土壤总孔隙度低以及非毛细管孔隙度低,透气性和渗透性差^[6],提升坡中和坡下土壤的持水能力,坡中和坡下土壤水分偏高。由于采样坡面位于逆层坡,坡地土壤水以垂直渗流为主^[10],坡上土壤层受垂直下渗快的影响而造成 20—40 cm 土壤含水率偏高。山地坡面分布着大量植物细根,植物会增加根系来加大对土壤水分的吸收^[27],造成坡中和坡下利用 0—20 cm 土壤水分偏多。表明在岩溶坡地,坡位是限制土壤质量含水率动态变化的一个重要因素,坡上对于季节性干旱的响应更加敏感,且缺水的程度更加显著。

3.2 坡位对植物水分来源的影响

岩溶山坡地表—地下二元水文地质结构复杂,不同坡位土壤层与岩石风化带的水分分布影响植物对水分的获取^[28],这是造成不同坡位植物水分来源分异的潜在要素。

雨季,岩溶坡地木本植物的水分来源组成中,坡上植物对表层岩溶带水源利用比例高于坡中和坡下,占 32%~38%,而 20—40 cm 土壤水分则为坡中和坡下植物主要利用水分来源,占 42%~46%。坡上土层浅薄持水能力差且水分多沿坡面以大孔隙流和侧向优先流等方式下渗^[6],坡上土壤含水量低下,坡上乔木和灌木均会灵活地调整水分来源,利用深根吸收深层水分^[13]。同时,表层岩溶带受到入渗补给水量增加,水位上升^[11],坡上植物更易于吸收表层岩溶带水分。张宗领等^[7]指出坡上光合有效辐射比坡下多 46.9%,坡上植物为维持蒸腾作用而促使根系延伸至表层岩溶带,吸收利用更加稳定的水源,从而减少水分胁迫^[10,14]。坡中和坡下更易于捕获坡上流失的水土资源,坡中和坡下土壤厚度较大且含水量较大,乔木和灌木均表现出优先利用更易于获得且消耗能量较小的土壤水^[9],坡中和坡下对 20—40 cm 土壤水分利用相对较多。因此,坡上植物对表层岩溶带水源利用比例偏高,但整体坡面上植物利用土壤水分为主,这与前人研究指出雨季期间岩溶植物多利用浅层根系吸收水分的结论类似^[29]。

然而,在旱季表层岩溶带水占岩溶坡地植物水分来源组成的 40% 以上,特别是在坡上和坡中,其贡献率甚至超过一半,成为岩溶坡地植物的主要水源。旱季土壤水资源的减少可能是一个重要的胁迫,有限的土壤水分难以维持植物生存,植物利用二形态根从浅层水源向深层水源转化,迫使植物激活深根以获取表层岩溶带水^[10-11,13-14]。女贞和侧柏主根和侧

根发达且能沿着岩石裂隙向下延伸^[10],而灌木黄荆和火棘虽多细根^[30-31],但主根发达,在旱季期间利用岩层水分为主^[31]。同时,研究区岩溶坡地上岩石普遍较为破碎,岩溶表层岩溶带的孔隙率较高,相比于穿透岩石,裂隙的存在为植物根系垂直延伸提供更为省力的通道^[10],使得不同坡位植物大量使用表层岩溶带水提供可能。此外,由于旱季小降雨事件能湿润浅层土壤,坡中和坡下 0—20 cm 处土壤质量含水率相对偏高,并且随着岩溶坡地深层土壤黏粒含量显著增大^[32],更加不利于降雨对深层土壤水分的补给,因此旱季期间坡中和坡下植物对 0—20 cm 处土壤水分利用比例略高于坡上。

本研究数据证实坡地植物水分利用模式对坡位较敏感,从不同坡位看,雨季坡面植物对土壤水的依赖性可能更加明显,而在遭受季节性水分胁迫时,坡地植物对表层岩溶带水的依赖性将明显提高,这一发现类似邓艳指出的表层岩溶带水是维持植物旱季生存水分消耗的水库的观点^[33]。

3.3 坡位对植物叶片 WUE_i 的影响

研究表明,岩溶坡地植物在旱季的 WUE_i 普遍高于雨季。雨季土壤水分充足,坡面上植物气孔多呈开放状态并且蒸腾作用强烈^[9],植物保持着较低的 WUE_i。旱季坡面土壤水分减少,植物会通过深根获取表层岩溶带水。然而,表层岩溶带孔隙度随深度增加而减小^[33],植物难以从中吸收水分,故植物采取“保守”的水分利用策略,减小叶片气孔开放降低水分蒸发,保持较高的 WUE_i 来减少水分消耗^[10,13-14]。

从不同坡位上看,无论是在旱季还是雨季,岩溶坡地植物叶片 WUE_i 整体均表现为坡上高于坡中和坡下,不同坡位乔木 WUE_i 略高于灌木。由于坡上土壤水分更加匮乏,植物多利用深根沿裂隙延伸摄取表层岩溶带水分较多^[10],但植物利用深根吸收深层水源会消耗更多的能量,同时面对长期土壤水分较少的条件下植物特别是常绿乔木更倾向于关闭叶片气孔来减少水分散失^[10],因此坡上植物特别是乔木提高 WUE_i 来维持生存。常绿灌木火棘和落叶树种黄荆多为浅细根,特别是直径小于 2 mm 细根具有较大的吸收土壤水分表面积,能对土壤水分的变化作出快速反应^[34],根系从土壤层吸收水分消耗能量较少,相较于乔木采取相对“挥霍”的水分利用策略,因此乔木 WUE_i 略高于灌木。由此可知,坡上乔木与灌木通过调整根系分布来改变水分吸收模式,影响水分利用效率,进而实现植物共存并适应坡上土壤水分较少的环境,这一研究结果与 Cai 等的研究结论相似^[35]。而坡下的土壤捕获坡上流失的细小沉积

物^[32],坡下以优先流方式流失水分较少,土壤含水量相对较高,坡下植物能利用水分较多,植物叶片保持较低 WUE_i。坡中土壤层厚度较坡上厚,破碎岩石为土壤提供遮阴,降雨在坡中以横向流动为主,流经中坡的土壤—地表界面,在低洼地区汇聚^[6],坡中土壤水分含量高于坡上,因此坡中植物叶片 WUE_i 低于坡上。总之,岩溶槽谷区坡上明显的缺水可迫使木本植物采取更加保守的水分利用策略。

4 结论

研究通过监测重庆明月山岩溶槽谷不同坡位典型植物茎干水及各水源 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值及叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,借助 SIMMR 模型分析木本植物水分来源与水分利用效率的差异。研究发现,岩溶坡地土壤含水率受坡位影响较大,其中,坡上的土壤含水率最低。深层土壤水是岩溶坡地木本植物重要的水分来源,但在土壤水有限的旱季,表层岩溶带水充当着岩溶坡地木本植物的重要水源。此外,无论旱雨季,岩溶坡地坡上木本植物的内在水分利用效率最高,证实岩溶区坡上明显的缺水可迫使木本植物采取更加保守的水分利用策略。鉴于此,在岩溶植被管理和恢复中,不仅要关注季节性的干旱胁迫,还需充分考量地貌对生态水文功能的具体影响,及其由此产生的植物水分利用策略的空间分异。

参考文献 (References)

- [1] 付昕宇,刘华民,于晓雯,等.岱海湖滨带湿地植物水分来源及利用策略研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(12):42-49.
Fu Xinyu, Liu Huamin, Yu Xiaowen, et al. Water sources and use strategies of plants in lake Daihai wetland [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(12):42-49.
- [2] Liu Changcheng, Liu Yuguo, Fan Dayong, et al. Plant drought tolerance assessment for re-vegetation in heterogeneous karst landscapes of southwestern China [J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2012,207(1):30-38.
- [3] Cai Lulu, Xiong Kangning, Li Yuan, et al. Coexisting plants restored in karst desertification areas cope with drought by changing water uptake patterns and improving water use efficiency [J]. Journal of Hydrology, 2025, 654:132813.
- [4] Jiang Guanghui, Guo Fang, Liu Fan, et al. Hydrogeological responses of karst compartments to meteorological drought in subtropical monsoon regions [J]. Journal of Hydrology, 2025,655:132940.
- [5] 石春茂,罗娅,杨胜天,等.干热河谷区不同坡位土壤水分对降雨的响应特征[J].应用生态学报,2022,33(5):1352-1362.
Shi Chunmao, Luo Ya, Yang Shengtian, et al. Responses of soil moisture at different slope positions to rainfall in dry-hot valley [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(5):1352-1362.
- [6] Zhang Jun, Wang Sheng, Fu Zhiyong, et al. Characterizing rapid infiltration processes on complex hillslopes: Insights from soil moisture response to rainfall events [J]. Journal of Hydrology, 2024,644:132110.
- [7] 张宗领,陈静.文山石漠化区坡柳水分利用效率与茎导管性状对坡位的响应[J].文山学院学报,2022,35(2):10-16.
Zhang Zongling, Chen Jing. Responses of water use efficiency and stem vessel traits of *Dodonaea viscosa* to slope position of Wenshan rocky desertification areas [J]. Journal of Wenshan University, 2022,35(2):10-16.
- [8] 蒋丹丹,万福绪,黄文庆.石灰岩山地坡位对侧柏光合蒸腾特性的影响[J].林业科技开发,2014(6):59-63.
Jiang Dandan, Wan Fuxu, Huang Wenqing. Slope positions effects on photosynthesis and transpiration characteristics of *Platycladus orientalis* in limestone mountain [J]. China Forestry Science and Technology, 2014(6):59-63.
- [9] Liu Wenna, Nie Yunpeng, Luo Zidong, et al. Transpiration rates decline under limited moisture supply along hillslopes in a humid karst terrain [J]. Science of The Total Environment, 2023,894:164977.
- [10] 吕同汝.亚热带岩溶槽谷顺/逆层坡适生树种的水分利用策略[D].重庆:西南大学,2022.
Lv Tongru. Water use strategy of suitable tree species on dip/anti-dip slope in subtropical karst trough valley [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [11] Wu Ze, Behzad H M, He Qiufang, et al. Seasonal transpiration dynamics of evergreen *Ligustrum lucidum* linked with water source and water-use strategy in a limestone karst area, southwest China [J]. Journal of Hydrology, 2021,597:126199.
- [12] Liu Jiuchan, Shen Licheng, Wang Zhengxiong, et al. Response of plants water uptake patterns to tunnels excavation based on stable isotopes in a karst trough valley [J]. Journal of Hydrology, 2019,571:485-493.
- [13] Cao Min, Wu Chao, Liu Jiuchan, et al. Increasing leaf $\delta^{13}\text{C}$ values of woody plants in response to water stress induced by tunnel excavation in a karst trough valley: Implication for improving water-use efficiency [J]. Journal of Hydrology, 2020,586:124895.
- [14] Wu Ze, Lv Tongru, Zeng Sibao, et al. Differential responses in water-use strategies of evergreen (*Ligustrum lucidum*) and deciduous (*Robinia pseudoacacia*) trees to tunnel excavation in a subtropical karst trough valley [J]. Journal of Hydrology, 2024,636:131323.

- [15] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes [J]. *Plant and Soil*, 2007, 291(1):93-107.
- [16] Brunel J P, 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, 167:351-368.
- [17] Parnell A C, Phillips D L, Bearhop S, et al. Bayesian stable isotope mixing models [J]. *Environmetrics*, 2013, 24(6):387-399.
- [18] Zhao Ying, Wang Li, Chun K P, et al. Dynamic hydrological niche segregation: How plants compete for water in a semi-arid ecosystem [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630:130677.
- [19] Farquhar G D, Richards R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes [J]. *Functional Plant Biology*, 1984, 11(6):539.
- [20] McCole A A, Stern L A. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 342(3/4):238-248.
- [21] Evaristo J, McDonnell J J, Clemens J. Plant source water apportionment using stable isotopes: A comparison of simple linear, two-compartment mixing model approaches [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(21):3750-3758.
- [22] Liu Jinke, Han Guilin. Tracing riverine particulate black carbon sources in Xijiang River Basin: Insight from stable isotopic composition and Bayesian mixing model [J]. *Water Research*, 2021, 194:116932.
- [23] O'Leary M H. Carbon isotope fractionation in plants [J]. *Phytochemistry*, 1981, 20(4):553-567.
- [24] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. *Geomorphology*, 2015, 250:1-14.
- [25] 张彩云, 蒋勇军, 马丽娜, 等. 岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1):49-55.
Zhang Caiyun, Jiang Yongjun, Ma Lina, et al. Characteristics of runoff and sediment on slope land with different land use in karst trough valley area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(1):49-55.
- [26] Tracy S R, Black C R, Roberts J A, et al. Soil compaction: A review of past and present techniques for investigating effects on root growth [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(9):1528-1537.
- [27] Gupta A, Rico-Medina A, Caño-Delgado A I. The physiology of plant responses to drought [J]. *Science*, 2020, 368(6488):266-269.
- [28] Wu Yuanzhi, Huang Mingbin, Warrington D N. Black locust transpiration responses to soil water availability as affected by meteorological factors and soil texture [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(1):57-71.
- [29] Behzad H M, Arif M, Duan Shihui, et al. Seasonal variations in water uptake and transpiration for plants in a karst critical zone in China [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 860:160424.
- [30] 吴静, 盛茂银, 肖海龙, 等. 西南喀斯特石漠化环境适生植物细根构型及其与细根和根际土壤养分计量特征的相关性 [J]. *生态学报*, 2022, 42(2):677-687.
Wu Jing, Sheng Maoyin, Xiao Hailong, et al. Fine root architecture of adaptive plants and its correlation with nutrient stoichiometric characteristics of fine root and rhizosphere soils in karst rocky desertification environments, SW China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2):677-687.
- [31] 何静. 川中丘陵区3种植物水分吸收与利用策略 [D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2022.
He Jing. Water absorption and utilization strategies of three plants in the hilly area of central Sichuan basin [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [32] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地土壤物理性质的时空分异及成因 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(9):2249-2256.
Liu Shujuan, Zhang Wei, Wang Kelin, et al. Spatio-temporal heterogeneity and its formation causes of soil physical properties in karst peak-cluster depression area of northwest Guangxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9):2249-2256.
- [33] 邓艳. 西南典型峰丛洼地岩溶关键带植被—表层岩溶水的耦合过程 [D]. 湖北武汉: 中国地质大学, 2018.
Deng Yan. Coupling process between vegetation and epikarst water in karst critical zone, southwest typical peak-cluster depression area [D]. Wuhan, Hubei: China University of Geosciences, 2018.
- [34] 曾伟康. 亚热带常见树种细根功能性状特征分析 [D]. 湖南长沙: 中南林业科技大学, 2023.
Zeng Weikang. The research on fine root functional traits and root economic space of common subtropical tree species [D]. Changsha, Hunan: Central South University of Forestry & Technology, 2023.
- [35] Cai Lulu, Xiong Kangning, Liu Ziqi, et al. Seasonal variations of plant water use in the karst desertification control [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 885:163778.