

滇中岩溶高原滇青冈原生林植物水分利用来源的稳定同位素分析

朱秀勤, 范 弢, 官 威, 覃 娜

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650000)

摘要: 为阐明滇中岩溶高原滇青冈 *Cyclobalanopsis glaucoides* 原生林植物水分利用机理及其对岩溶干旱生境的适应策略, 运用氧稳定同位素技术, 分析了滇青冈, 云南木樨榄 *Olea yuennanensis*, 清香木 *Pistacia weinmannifolia* 等 3 种不同年龄阶段常见优势木本植物小枝木质部水分及土壤水、表层岩溶带水氧同位素值的相关性, 确定植物水分来源, 并通过 IsoSource 模型计算不同潜在水源对滇青冈原生林的贡献。结果表明: 滇青冈及其伴生的乔木水分利用层位及利用比例呈现时空差异, 并形成明显的水分竞争关系。旱季, 滇青冈、成熟云南木樨榄、幼龄清香木主要利用 55~115 cm 深层土壤水, 成熟的滇青冈和清香木对表层岩溶带水利用比例增加。雨季, 成熟的滇青冈、云南木樨榄、清香木和幼龄清香木因大气降水对浅表层土壤的补给主要利用 20~55 cm 土壤水, 利用比例分别为 100%, 33.3%, 66.0%, 37.4%, 幼龄植株对表层岩溶带水的利用比例大于成熟植株。图 2 参 23

关键词: 生态水文学; 氧同位素; 植物水分来源; 滇青冈原生林; IsoSource 模型; 滇中岩溶高原
中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2014)05-0690-07

Soil-water utilization levels in a *Cyclobalanopsis glaucoides* virgin forest on the Central Yunnan Karst Plateau

ZHU Xiuqin, FAN Tao, GUAN Wei, QIN Na

(School of Tourism and Geographical Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650000, Yunnan, China)

Abstract: To explain the water utilization mechanism of a *Cyclobalanopsis glaucoides* virgin forest on the Central Yunnan Karst Plateau in southwest China, and its adaptive strategies in an arid karst habitat, a stable isotope technique was featured to determine soil-water levels utilized by plants. Several dominant plant species (*C. glaucoides*, *Olea yuennanensis*, and *Pistacia weinmannifolia*) were selected and tested with oxygen isotopes of water on stems and soils from the virgin forest. Using IsoSource model calculations the contribution of different water samples was determined. Results revealed that water utilization positions and proportions for *C. glaucoides* in the primeval forest and its accompanying trees varied in time and space, and were competitors for water. During dry seasons, *C. glaucoides*, mature *O. yuennanensis*, and young *P. weinmannifolia* used soil water from depths of 55–115 cm with more groundwater used for mature *C. glaucoides* and mature *P. weinmannifolia*. In rainy seasons, because of the precipitation, 100% of the mature *C. glaucoides*, 33.3% of the *O. yuennanensis*, 66.0% of the *P. weinmannifolia*, and 37.4% of the young *P. weinmannifolia* used the 20–55 cm soil-water level. [Ch., 2 fig. 23 ref.]

Key words: ecohydrology; stable ^{18}O isotope; water utilization source; *Cyclobalanopsis glaucoides* virgin for-

收稿日期: 2013-11-11; 修回日期: 2014-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41261007); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)前期专项(2009CB426312); 云南省自然科学基金资助项目(2011FZ077)

作者简介: 朱秀勤, 从事岩溶环境与水资源研究。E-mail: 493150674@qq.com。通信作者: 范弢, 教授, 博士, 从事生态水文学研究。E-mail: fantao080@sina.com

est; IsoSource model; Central Yunnan Karst Plateau

中国南方岩溶高原地区由于岩石孔隙裂隙发育,加上土层浅薄且不连续,地表持水能力差,漏失严重,加上降水时空分布不均,使得水分成为喀斯特地区植物生长的主要限制因子。喀斯特生境对植物种类具有较强的选择性,一般是易于生长,根系发达,能在岩溶环境中求得水分和养分的补充的植物,但植物水分具体来源一直是一个困扰的问题。针对植物根系吸收水分过程和水分在植物根部与茎干之间运输时,在水分到达如叶片或幼嫩未栓化的枝条之前不发生同位素分馏^[1],因此,通过植物根系和茎干木质部水的同位素组成可得出植株所利用水的同位素组成状况^[2]。对于喀斯特地区植物,传统方法很难确定植物具体吸收哪层土壤水分,并且根系的分布并不意味着水分或养分的吸收。喀斯特地区特殊的生境,植物根系分布与其他常态地貌下的根系模型有很大差异^[3],再加上根系模型建立需耗费巨大人力物力,直接测定地下生态过程也十分困难,使得相关的根系分布数据极少^[4]。运用稳定同位素技术,通过对比植物木质部水与各种水源的氘(D)和¹⁸O组成,可得出植物利用的水分如降水、土壤水、地下水或表层岩溶带水,并且可以确定植物对不同水源利用的程度^[5-6]。在中国,环境同位素技术在喀斯特地貌区得到广泛应用^[7-10],但主要集中在多属于峰丛洼地的广西^[11]和贵州^[12],而对以溶丘洼地为主^[13]的云南喀斯特高原区研究较为薄弱。研究区属滇中高原岩溶地貌,位于石林地质公园,公园内部经过多年的退耕还林和保护等措施,植被出现了草丛、灌草地、灌丛、人工林、次生林、原生林等不同演替阶段的群落,不同树种、树龄在不同演替阶段水分利用来源存在较大差异^[11-12]。其中原生林具备自然演化和自我更新的能力,是对某一地貌和气候的适应,在涵养水源、保持水土、调节气候和维持生态平衡等方面起着重要作用。因此本研究选取了滇中石林国家地质公园中保护较好的滇青冈原生林作为研究对象,通过分析滇青冈原生林中几种典型植被的木质部水及其各种潜在水源中的氧稳定同位素,得出植物水分利用来源季节变化,并结合 IsoSource 模型^[13-14]分析潜在水源利用比例,初步阐明原生林植物水分利用机制及对岩溶干旱生境的适应策略,探讨如何在有限水资源下对喀斯特区植被进行有效恢复,为深入研究岩溶区脆弱生态环境植被保护和植被恢复提供实例,也为该区水源涵养林的选择提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区滇中石林地质公园位于巴江流域中部,是中国西南岩溶高原区典型的溶丘洼地喀斯特地貌区,是喀斯特岩溶地貌的典型代表,位于云南省昆明市石林彝族自治县境内(24°30'~25°03' N, 103°10'~104°40' E)。海拔为 1 780~1 950 m,属低纬高原北亚热带季风气候区,多年平均降水量约 960 mm,有明显的早雨季之分(每年 5~10 月为雨季,降水量约占全年的 85.3%,11 月至次年 4 月为旱季),多年平均气温为 15.6 °C。研究区坡向为正东方向,发育地层主要是下二叠统碳酸盐岩,发育土层浅薄且不连续,土体厚度为 90~140 cm,岩石出露约 30%~40%,其土石比为 55%:45%,主要为山原红壤和红色石灰土。植被多生长于石缝、石沟、小土坑、微台地上,森林及灌丛植被多分布于坡面上,坡脚具很多泉点。在喀斯特的岩石层面裂隙发育,形成了与地表关系密切的地表岩溶带。在巴江流域岩溶包气带上部浅表层(<50 m)发育表层岩溶带,形成了稳定含水层,该层称为喀斯特表层岩溶带水,是石林地区重要的生产和生活水源。

石林地质公园处于中国—日本与中国—喜马拉雅植物区系的过渡带位置,其中研究样地密枝山有原始性强的落叶常阔混交林,主要从原生裸地演替而来,地带性植被以滇青冈林为代表^[15],曾经广泛分布在滇中地区的土山和石灰岩山地^[16],具有较强的适应性,是森林恢复到一定程度才出现的物种。滇青冈原生林中滇青冈 *Cyclobalanopsis glaucoides* 约占 1/4,样地群落类型为滇青冈林,属滇中石灰岩山地的半湿润常绿阔叶林中偏干的地带性植被,可分为乔木、灌木、草本层,其中乔木层覆盖度约 70%,主要以滇青冈,黄毛青冈 *Cyclobalanopsis delawayi*,清香木 *Pistacia weinmannifolia*,云南木樨榄 *Olea yuennanensis*,黄连木 *Pistacia chinensis* 等为主,约 15~20 m 高,灌木层覆盖度约 60%,主要以小铁子 *Myrsine africana*,针齿铁子 *Myrsine semiserrata* 等为主,郁闭的林冠层,对研究区水源涵养、生态恢复有着重大作用。

1.2 研究方法

1.2.1 采样 物种采集: 在石林公园内的滇青冈原生林样地进行了系统监测, 选择具有代表性的无人干扰或干扰较小的样点, 选取滇青冈、清香木和云南木樨榄等 3 种广泛分布的植物。为了便于比较, 相同植物均选择胸径差异较大的成熟和幼龄植株各 1 株。取样时间为旱季(2010年4月13日)和雨季(2010年7月14日), 在天气状况比较稳定的上午(7:00-9:00)采集阳面栓化没叶片的小枝, 长约 10 cm, 去除韧皮保留木质部, 迅速去皮后装入采样瓶并用 parafilm 封口膜密封, 然后放入随身携带的冰盒(约 4 °C), 带回实验室冷冻保存。土样采集: 在所选植物冠幅内的树根附近打土钻取样, 从地表 0~20 cm(浅层)、20~55 cm(中层)、55~115 cm(深层)分级取土样约 30 g, 混合完全后立即放入样品袋中密封以防蒸发, 样品立即冷冻保存, 供土壤水采集。水样采集: 在采样点附近设置 3 个固定点收集大气降水, 收集附近喀斯特表层泉以代表层岩溶水及该区浅层地下水, 雨水样和泉水样取后立即封装于 10 mL 干净聚乙烯瓶中, 并放入少量矿物油, 冷藏(4 °C)备用。

1.2.2 样品分析 植物茎和土壤水的提取用低温真空蒸馏法, 抽提出的水分密封于玻璃瓶中低温(2 °C)保存。水样的 D 和 ^{18}O 在中国地质科学院桂林岩溶地质研究所岩溶地质与资源环境监督检测中心由 Finnigan MAT-253 质谱仪测定, 实验结果采用标准平均大洋水(SMOW)标准校正, 实验误差低于 0.5‰。

1.2.3 数据分析 将植物木质部水和各潜在水源的同位素值带入 IsoSource 模型, 计算不同潜在水源对植物的贡献比例, 计算时来源增量设为 1.0%, 不确定性水平设为 0.1%~0.5%。

2 结果与分析

2.1 雨水、表层岩溶水及土壤水同位素的特征

由于采样时段来自孟加拉湾和南海水汽通道的水汽输送明显弱于常年, 研究区发生极端气象干旱, 降水量较常年偏少 53.3%, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较高, 当地降水线(LMWL: $\delta\text{D} = 8.22 \delta^{18}\text{O} + 12.00$)的斜率和截距略大于全球大气降水线(GMWL: $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10.00$)的斜率和截距。说明当时巴江流域受极端干旱影响, 季风降水不足, 地表水蒸发强烈, 使得巴江流域局地水汽再循环强烈, 重同位素富集。表层岩溶水 $\delta^{18}\text{O}$ 旱雨季变化较小, 雨季平均值为 -6.34‰ , 旱季为 -6.48‰ , 表明其具有稳定性和可靠性。在图 1 中, 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 在旱季随土层变浅而偏正, 55~115 cm 变化幅度较大; 雨季, 在 20~55 cm, 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 随土层变浅而偏正, 说明 55 cm 土层以上的浅表层土壤的蒸发作用极为显著, 而 55 cm 以下土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 随深度增加而偏正, 可能是受到表层岩溶水的影响。此外, 土壤剖面水分的显著差异与土壤质地、植物根系在土壤剖面的分布及植物水分利用等有关^[2]。

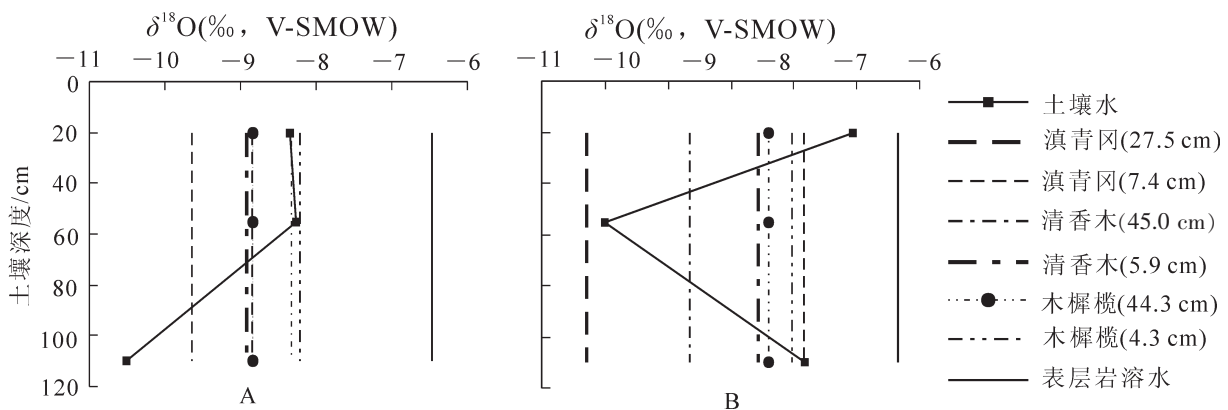


图 1 旱雨季滇青冈原生林植物木质部水与土壤水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化(A.旱季, B.雨季)

Figure 1 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ of stem water, soil water and groundwater of *Cyclobalanopsis glaucoides* primeval forest during rainy seasons (A. dry season, B. rainy season)

2.2 植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值及水分来源

滇青冈原生林植物木质部水与不同深度土壤水及表层岩溶带水的 $\delta^{18}\text{O}$ 对比表明, 植物对土壤水和表层岩溶水均有利用, 但植物根系在土壤中的分布范围因树种、树龄的不同而有差异, 因而吸收的水源有

显著差异。

旱季不同植物水分来源存在较大差异，水分竞争格局明显。清香木(45 cm，该值为胸径)和云南木樨榄(4.3 cm)木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -8.33‰ 和 -8.23‰ ，与中层土壤水的同位素值接近，表明两者水分利用主要来源于中层土壤水。滇青冈(27.5 cm)和滇青冈(7.4 cm)的 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负，值分别为 -9.64‰ 和 -8.85‰ ，该种植被与深层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 接近，说明主要利用深层土壤水(图 1A)。

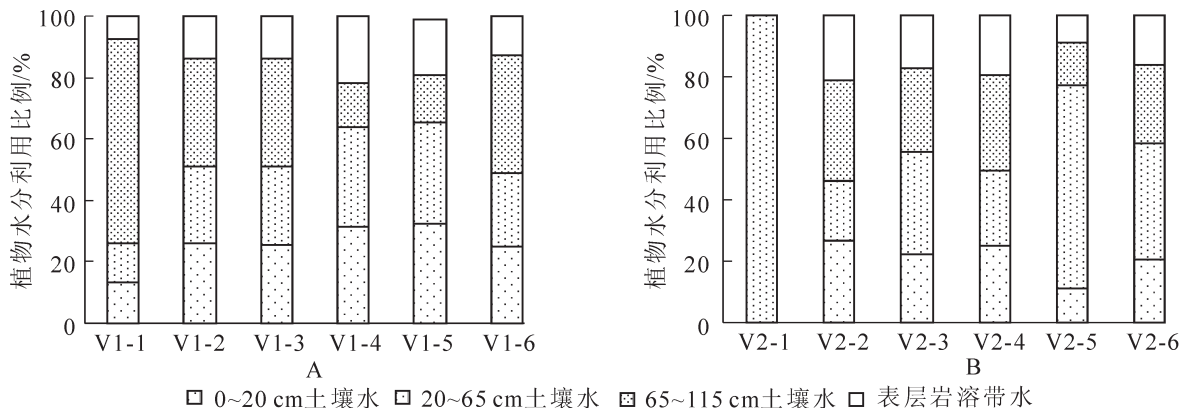
旱季不同年龄阶段植物水分来源存在较大差异。幼龄云南木樨榄(4.3 cm)的 $\delta^{18}\text{O}$ 与中层土壤水接近，成熟云南木樨榄(44.3 cm)的 $\delta^{18}\text{O}$ 与深层深沉土壤水接近；幼龄清香木(5.9 cm)的 $\delta^{18}\text{O}$ 与深层土壤水接近，成熟清香木(45.0 cm)与中层土壤水接近；幼龄滇青冈(7.4 cm)与成熟滇青冈(27.5 cm)的 $\delta^{18}\text{O}$ 存在较大差异，但所吸收水分主要来源于深层土壤水。

雨季不同植物水分来源存在较大差异(图 1B)。滇青冈(27.5 cm)和清香木(45.0 cm)木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负，同位素值分别为 -11.28‰ ， -9.67‰ ，与 55 cm 深度土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 接近。成熟云南木樨榄(44.3 cm)和幼龄云南木樨榄(4.3 cm)的木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -8.39‰ 和 -8.03‰ ，与 20~115 cm 中深层土壤水接近。雨季不同年龄阶段植物水分来源存在较大差异(图 1B)。幼龄云南木樨榄(4.3 cm)和成熟云南木樨榄(44.3 cm)，幼龄清香木(5.9 cm)和成熟清香木(45.0 cm)的 $\delta^{18}\text{O}$ 相差都不大，与 20~55 cm，55~115 cm 土壤水都有接近的点；幼龄滇青冈(7.4 cm) $\delta^{18}\text{O}$ 与中层、深层土壤水都有接近的点，成熟滇青冈(27.5 cm) $\delta^{18}\text{O}$ 与 55 cm 土壤水接近。

2.3 植物对各可能水源的利用比例

通过 IsoSource 模型计算(图 2)，得出植物对土壤水利用比例最大，尤其是 20~115 cm 土壤水对植物贡献比例最大。在降水量较少的旱季，其中滇青冈(27.5 cm)，滇青冈(7.4 cm)，云南木樨榄(44.3 cm)和清香木(5.9 cm)主要利用深层土壤水，利用比例为 66.4%，35.6%，35.4% 和 37.9%；云南木樨榄(4.3 cm)和清香木(45 cm)在中层土壤水利用比例最高，分别为 32.7% 和 32.8%。在植物生长旺盛的雨季，中层土壤水对植被贡献率最高，其中滇青冈(27.5 cm)，云南木樨榄(44.3 cm)，清香木(45.0 cm)和清香木(5.9 cm)主要利用中层土壤水，利用比例分别为 100%，33.3%，66.0% 和 37.4%；滇青冈(7.4 cm)和云南木樨榄(4.3 cm)在深层土壤水利用比例最高，分别为 32.9% 和 31.1%。

表层岩溶水是岩溶区植物水分利用主要水源之一，具有一定的稳定性。雨季，幼龄植株对表层岩溶水的利用比例明显大于成熟植株，如滇青冈(7.4 cm)20.9%与滇青冈(27.5 cm)0%，云南木樨榄(4.3 cm)19.6%和云南木樨榄(44.3 cm)17.2%，清香木(5.9 cm)16.2%和清香木(45.0 cm)8.8%，旱季的滇青冈和云南木樨榄也存在此现象。从雨季过度到旱季，大部分成熟植株对表层岩溶水的利用增加[如滇青冈(27.5 cm，清香木(45.0 cm)]，而幼龄植株却相对减少[滇青冈(7.4 cm)，清香木(5.9 cm)]。



V1-1.旱季滇青冈(27.5 cm); V1-2.旱季滇青冈(7.4 cm); V1-3.旱季云南木樨榄(44.3 cm); V1-4.旱季云南木樨榄(4.3 cm); V1-5.旱季清香木(45.0 cm); V1-6.旱季清香木(5.9 cm); V2-1.雨季滇青冈(27.5 cm); V2-2.雨季滇青冈(7.4 cm); V2-3.雨季云南木樨榄(44.3 cm); V2-4.雨季云南木樨榄(4.3 cm); V2-5.雨季清香木(45.0 cm); V2-6.雨季清香木(5.9 cm)。

图 2 旱雨季滇青冈原生林中的代表植物对土壤水及表层岩溶带水提升及利用的比例(A.旱季, B.雨季)
Figure 2 Calculated water uptake from three soil layers and the subcutaneous flow for *Cyclobalanopsis glaucooides* virgin forest plots(A. dry season, B. rainy season)

3 讨论

3.1 雨季植物水分来源的差异

在自然生态系统中,由于植物根系的类型或分布深度的不同,导致不同树种或不同树龄的植物水分来源在季节上存在差异。雨季,土壤水和表层岩溶带水是滇青冈、云南木樨榄和清香木等不同植物的主要水源,但利用比例存在较大差异,主要集中在中层土壤水,对降水补给的浅表层土壤水的利用反而相比旱季减少。可能是因为该区特殊的地表,降落到地表层雨水迅速漏失到中层土壤中,中层土壤持水率较表层高,能大量被植物所吸收。相比贵州的喀斯特专属植物荔波瘤果茶 *Camelia rubimuricata*^[17],因其生长在深厚的土面上,而雨季降水使得浅层土壤水分充足,植株可以吸收到足够的表层土壤水,因此其主要利用浅层土壤水。原因是雨季降水量相对充沛,补给地表以下各含水层,而植物主要利用储存于浅层裂隙中的雨水,主要是植物通过表层根系吸收水分时消耗能量相对较少,因此当表层土壤或浅层裂隙中有水可用时,植物优先利用储存在这里的水分^[18]。

为适应环境因子的变化,植物根系及其分布特征会相应地改变,土壤水分决定活性根系的分布^[19]。雨季降水相对丰沛,研究区中层土壤水分充足,成熟的滇青冈、云南木樨榄、清香木主要发展侧根来满足对水分的供求。McCole等^[7]在美国爱德华兹高原喀斯特地区发现,常绿灌木杉木 *Juniperus ashei* 在冷湿冬季主要水分来源以10~30 cm土壤水为主。但在干旱地区,随雨季到来,某些物种从以吸收深层土壤水或地下水为主转变为以吸收降雨补给的浅层土壤水为主^[20]。幼龄滇青冈和云南木樨榄吸收深层土壤水和表层带岩溶水明显大于成熟植株。根据水分利用策略,植株在幼龄时期先发展深根系,穿梭于深层土壤和表层岩溶带中,以保障有充足稳定的水分可供吸收。主要是喀斯特区浅层裂隙虽能储存一定量的雨水,但由于储水有限,及不同植物对浅层裂隙水的利用竞争激烈,因此一些植物为获取稳定的水源而用深层水分,土层浅薄的喀斯特地区表现尤为明显。Rose等^[21]发现生长在内华达山脉南部浅薄土层(土层下为深厚的花岗岩风化基岩层)上的黑材松 *Pinus jeffreyi* 在幼龄时期主要利用土壤水,而在生长季后成熟期主要利用风化基岩层水分。

3.2 旱季植物水分来源的差异

根系分布对植物功能的维持起着关键作用,尤其是喀斯特区在没有灌溉的条件下植物仍能支持度过严峻的干旱时期,说明喀斯特植物可能通过根系伸展获取稳定的水分来源。旱季降水偏少,表层土壤蒸发强烈,水分散失,浅中层土壤水分也随之减少,植被为了度过干旱季节,由利用雨季的中层土壤水转而利用深层土壤水。云贵高原向广西丘陵盆地的过渡地带的茂兰喀斯特区,在少雨时期,土壤下层水对原生林的贡献率达1/3^[3]。滇青冈(27.5 cm),滇青冈(7.4 cm),云南木樨榄(44.3 cm)和清香木(5.9 cm)所吸收的水分主要来源于深层土壤水,该层次水源受外界干扰小,并有地下水补给,较为稳定,为植物度过干旱时期起着关键作用。无论是幼龄还是成熟的滇青冈,在干旱季节都偏向于对深层土壤水利用,主要是它有强壮的根系,攀附岩石、穿窜裂隙,在裂隙土壤水、岩溶水中求得水分的补充。植物根系这种寻找并扎入裂隙的行为,可被认为是根系的向水性或向地性或两者共同作用的结果^[22]。贵州的荔波瘤果茶在旱季利用深层土壤水存在相似特征^[17]。幼龄云南木樨榄对浅层、中层土壤水和表层岩溶水都维持着较大的吸收,但仍主要偏向于中层和浅表层土壤水的利用,侧根发达有关。幼龄清香木主要利用深层土壤水,但成熟清香木主要利用中层和表层土壤水。其原因可能是植物的深层根将其所在深层土壤中吸收的水分传输到浅层土壤中,供浅根使用,出现植物水分再分配^[23],可能与植物的双层根系分布有关。

相对于表层岩溶带水,植物水分利用存在较大差异。表层岩溶带水位于渗流带上部,由于降水的补给作用,既有一般地下水的性质,又带有雨水的同位素特性,即存在明显的季节差异和雨量效应^[12]。成熟植株滇青冈(27.5 cm)和清香木(45.0 cm)在旱季对表层岩溶带水的利用相对雨季有较大的提高,而幼龄植株滇青冈(7.4 cm)和清香木(5.9 cm)利用比例却降低。主要是旱季降水量减少,对土壤水补给减少,成熟植株根系发达,为度过干旱时期增加对表层岩溶带水的吸收,而幼龄植株因表层岩溶带水补给减少而水面降低,所能吸收的表层岩溶带水相对雨季减少。植物利用表层岩溶带水是适应喀斯特干旱环境的重要策略。美国爱德华兹高原喀斯特地区的常绿灌木杉木为度过干热的夏季主要以稳定的表层岩溶带水为主^[7]。

4 结论

研究表明: ①不同植物种或不同年龄植物具有不同的水分利用模式, 能够吸收在空间和时间上存在差异的水源, 而土壤水和表层岩溶带水是喀斯特区植物主要水分来源。②雨季, 植物主要以降水为补给的中层土壤水为主, 旱季主要以较为稳定的深层土壤水为主。③成熟滇青冈在雨季所利用水分来自中层土壤水, 旱季主要来自深层土壤水和表层岩溶水; 幼龄滇青冈无论旱雨季都偏向于对深层土壤水和表层岩溶水的利用; 成熟云南木樨榄雨季主要利用中层土壤水, 旱季则是深层土壤水, 与幼龄云南木樨榄截然相反; 成熟清香木无论旱雨季都利用中层土壤水, 幼龄清香木则与成熟滇青冈相似。

根系能对环境变化做出反映, 在一定程度上根系反应了土壤—植物间物质和能量的交换。滇青冈原生林中不同物种、不同年龄阶段植物水分利用策略, 是植被群落对缺乏地表水岩溶区的适应机制, 说明植物根系具有向水性和二态分布特点, 使植物在不同时期获得充足水分来源。根据几种植物的水分利用策略, 可发现深根吸水植物水分利用最为合理, 雨季充分利用降水补给, 旱季又有稳定水源度过干旱时期。因此, 在滇中石林地质公园生态恢复过程中, 建议多栽种深根吸水植物以适应地表水的缺乏。

参考文献:

- [1] ALESSIO G A, de LILLIS M, BRUGNOLI E, *et al.* Water sources and water-use efficiency in mediterranean coastal dune vegetation [J]. *Plant Biol*, 2004, **6**(3): 350 – 357.
- [2] 赵良菊, 肖洪浪, 程国栋, 等. 黑河下游河岸林植物水分来源初步研究, 地球学报, 2008, **29**(6): 709 – 718. ZHAO Liangju, XIAO Honglang, CHENG Guodong, *et al.* A preliminary study of water sources of riparian plants in the lower reaches of the Heihe Basin [J]. *Acta Geosci Sin*, 2008, **29**(6): 709 – 718.
- [3] 容丽, 王世杰, 俞国松. 荔波喀斯特森林4种木本植物水分来源的稳定同位素分析[J]. 林业科学, 2012, **48**(7): 14 – 22. RONG Li, WANG Shijie, YU Guosong, *et al.* Stable isotope analysis of water sources of four woody species in the Libo karst forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(7): 14 – 22.
- [4] SCHENK H J, JACKSON R B. Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics [J]. *Geoderma*, 2005, **126**(1): 129 – 140.
- [5] 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 C₄ grasses in a semiarid grassland [J]. *Tree Physiology*, 2009, **29**(2): 157 – 169.
- [6] YANG Hao, AUERSWALD K, BAI Yongfei, *et al.* Complementarity in water sources among dominant species in typical steppe ecosystems of Inner Mongolia, China [J]. *Plant Soil*, 2010, **340**(1/2): 303 – 313.
- [7] 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]. *J Hydrol*, 2007, **342**(3/4): 238 – 248.
- [8] SCHWINNING S. The water relations of two evergreen tree species in a karst savanna [J]. *Oecologia*, 2008, **158**(3): 373 – 383.
- [9] REN H. A review of the studies of desertification process and restoration mechanism of karst rocky ecosystem [J]. *Trop Geogr*, 2005, **25**(3): 195 – 200.
- [10] QUEREJETA J I, ESTRADA-MEDINA H, ALLEN M F, *et al.* Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate [J]. *Oecologia*, 2007, **152**(1): 26 – 36.
- [11] 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. NIE Yunpeng, CHEN Hongsong, WANG Kelin. Seasonal variation of water sources for plants growing on continuous rock outcrops in limestone area of southwest China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35**(10): 1029 – 1037.
- [12] 石林研究组. 中国路南石林喀斯特研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2011.
- [13] PHILLIPS D L, GREGG J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources [J]. *Oecologia*, 2003, **136**(2): 261 – 269.
- [14] PHILLIPS D L, NEWSOME S D, GREGG J W. Combining sources in stable isotope mixing models: alternative

- methods [J]. *Oecologia*, 2005, **144**(4): 520 – 527.
- [15] 吴毅, 刘文耀, 沈有信, 等. 滇石林地质公园喀斯特山地天然林和人工林凋落物与死地被物的动态特征[J]. 山地学报, 2007, **25**(3): 317 – 325.
WU Yi, LIU Wenyao, SHEN Youxin, *et al.* Dynamics of litterfall and litter on forest floor of natural forest and plantations in Stone Forest World Geological Park [J]. *J Mount Sci*, 2007, **25**(3): 317 – 325.
- [16] 金振洲. 云南常绿阔叶林的类型和特征[J]. 云南植物研究, 1979, **1**(1): 90 – 105.
JIN Zhenzhou, The types and characteristics of evergreen broad-leaf-forest in Yunnan [J]. *Acta Bot Yunnan*, 1979, **1**(1): 90 – 105.
- [17] 邓晓琪, 王世杰, 容丽. 喀斯特区专属植物水分来源研究[J]. 地球与环境, 2012, **40**(2): 154 – 160.
DENG Xiaoqi, WANG Shijie, RONG Li. Study on water sources of proper plant species in Karst areas [J]. *Earth Environ*, 2012, **40**(2): 154 – 160.
- [18] SCHENK H J, JACKSON R B. The global biogeography of roots [J]. *Ecol Monogr*, 2002, **72**(3): 311 – 328.
- [19] 郝艳茹, 彭少麟. 根系及其主要影响因子在森林演替过程中的变化[J]. 生态环境, 2005, **14**(5): 762 – 767.
HAO Yanru, PENG Shaolin, Variation of roots and its impact factors in succession [J]. *Ecol Environ*, 2005, **14**(5): 762 – 767.
- [20] 边俊景, 孙自永, 周爱国, 等. 干旱区植物水分来源的 D, ¹⁸O 同位素示踪研究进展[J]. 地质科技情报, 2009, **28**(4): 117 – 120.
BIAN Junjing, SUN Ziyong, ZHOU Aiguo, *et al.* Advances in the D and ¹⁸O isotopes of water source of plants in arid areas [J]. *Geol Sci Technol Inf*, 2009, **28**(4): 117 – 120.
- [21] ROSE K L, GRAHAM R C, PARKER D R. Water source utilization by *Pinus jeffreyi* and *Arctostaphylos patula* on thin soils over bedrock [J]. *Oecologia*, 2003, **134**(1): 46 – 54.
- [22] POOT P, LAMBERS H. Shallow-soil endemics: Adaptive advantages and constraints of a specialized root-system morphology [J]. *New Phytol*, 2008, **178**(2): 371 – 381.
- [23] 李鹏菊, 刘文杰, 王平元, 等. 西双版纳石灰山热带季节性湿润林内几种植物的水分利用策略[J]. 云南植物研究, 2008, **30**(4): 496 – 504.
LI Pengju, LIU Wenjie, WANG Pingyuan, *et al.* Plant water use strategies in a limestone tropical seasonal moist rainforest in Xishuangbanna, SW China [J]. *Acta Bot Yunnan*, 2008, **30**(4): 496 – 504.