

滇东南岩溶山地不同恢复模式云南松水分利用策略的差异

户红红,陈进豪,牟 洋,方 薇,匡媛媛,范 驶*

(云南省高原地理过程与环境变化重点实验室,云南师范大学 地理学部,云南 昆明 650500)

摘 要:研究云南松不同恢复模式下的水分利用策略以探究植物合理的种间配置结构,为岩溶区脆弱生态环境的恢复提供重要的科学依据。通过测定云南松及混交群落内 4 种植物(清香木、香樟、滇青冈、锥连栎)的茎秆水和不同水源的氢氧同位素值,结合植物叶片碳同位素值,进而探究植物的水分利用策略。结果表明:1)岩溶地下水是喀斯特植物的稳定水源,云南松混交林中 20~60 cm 土壤层含水量显著高于纯林,旱雨季最大相差 10.36%和 15.19%,表明混交林内水分条件更好。2)云南松混交林相较于纯林,水源的利用比例季节波动小,旱季香樟与清香木加大了对岩溶地下水的利用比例 18.1%、19.2%,降低了种间竞争,其深根提升上来的水分又可惠及云南松及浅根植物。3)与纯林中云南松相比,混交林中云南松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值季节变化小,表明水分利用效率相对稳定。云南松可以与清香木、香樟等阔叶树种混交种植,能够提高云南松的存活率,也减少植物群落在水源利用中的竞争。

关键词:云南松;稳定氢氧同位素;叶片 $\delta^{13}\text{C}$;植物水分利用

中图分类号:S791.24 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)01-0037-08

Differences of Water Use Strategies of *Pinus yunnanensis* in Different Recovery Modes in Karst Mountains in Southeast Yunnan

HU Hong-hong, CHEN Jin-hao, MOU Yang, FANG Wei, KUANG Yuan-yuan, FAN Tao*

(Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Changes, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: To study the water utilization strategy of *Pinus yunnanensis* under different recovery modes, so as to explore the reasonable inter-species configuration of plants, and to provide important scientific basis for the restoration of fragile ecological environment in karst areas. Through measuring the hydrogen and oxygen isotope values of stem water and different water sources of four plants mixed in *P. yunnanensis*, i. e., *Pistacia weinmannifolia*, *Cinnamomum camphora*, *Cyclobalanopsis glaucoides*, and *Quercus franchetii*, and combining the carbon isotope values of plant leaves, the water utilization strategies of plants were explored. 1) Karst groundwater was a stable water source for karst plants. The water content in 20—60 cm soil in *P. yunnanensis* mixed forest was significantly higher than that in pure forest, and the maximum differences in drought and rainy seasons were 10.36% and 15.19%, respectively, indicating that the water condition in mixed forest was better. 2) Compared with pure forest, mixed forest of *P. yunnanensis* had less seasonal fluctuation in water utilization ratio. In dry season, *C. camphora* and *P. weinmannifolia* increased the utilization ratio of karst groundwater by 18.1% and 19.2%, resulting the decrease of inter-species competition, and the water raised by deep roots could benefit *P. yunnanensis* and shallow-rooted plants. 3) Compared with *P. yunnanensis* pure forest, the leaf $\delta^{13}\text{C}$ value of mixed forest had a small sea-

收稿日期:2020-03-01 修回日期:2020-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目《滇东岩溶高原云南松水源林产水功能恢复机理研究》(41661004)。

作者简介:户红红。研究方向:喀斯特生态水文。E-mail:2531239276@qq.com

* 通信作者:范 驶,教授,博士。研究方向:岩溶生态学。E-mail:fantaoji@163.com

sonal variation, indicating that its water use efficiency was relatively stable. *Pinus yunnanensis* can be mixed with broad-leaved tree species such as *P. weinmannifolia* and *C. camphora*, which can improve the survival rate of *P. yunnanensis* and reduce the competition of plant communities in water utilization.

Key words: *Pinus yunnanensis*; stable isotope; leaf $\delta^{13}\text{C}$; plant water use

滇东南岩溶地区由于地表水分亏缺频繁、生态环境脆弱^[1],石漠化问题突出,植被恢复重建是滇东南岩溶地区的生态恢复的关键。因此树种的选择和生境极为重要。云南松(*Pinus yunnanensis*)作为我国西南地区特有速生造林树种,占云南全省林地总面积的 52%,在涵养水源和改善生态环境等方面具有重要作用,在国土安保和林产品生产中占有举足轻重的地位^[2-5]。然而,近些年许多云南松更新困难,林分组成简单,80%为同龄纯林,林地生产力不高,优质可用云南松林资源的数量快速减少,濒临枯竭^[6-8]。目前多数研究者将其归因为种特性、环境气候变化、土地退化、病虫害以及养分的利用效率等方面^[3,9-10]。在全球气候极端变化的背景下,季节性干旱明显的喀斯特地区,水分是否会造成云南松的诸多不良状况,云南松能否获得充足的水分供应,水分来源有何特征,响应季节性干旱胁迫等问题目前还缺乏明确的认识^[11]。

目前环境同位素技术在喀斯特地貌区及植物的水分利用等方面得到广泛应用^[12-16],可通过测定植物茎干水和可能水源水的氢氧稳定同位素值判断植物对各个水源的相对利用比例^[17-18]。植物水分利用策略的另一重要内容是植物水分利用效率(WUE),植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值越负,其 WUE 越低^[19-21]。植物对水分的利用策略反映了生态系统对区域水分条件变化的响应。植物在不同季节会采用不同的水分利用策略,当雨水和表层水分充足时,某些深根性植物会转向吸收利用表层水分^[22]。生长在岩溶区浅层土壤的成熟常绿树在旱季会利用深层土壤水及岩溶地下水来抵抗干旱^[23]。我国喀斯特地貌分布广泛的广西^[24-25]、贵州^[26-27]均有当地典型喀斯特植被水分利用的研究,云南松作为滇东南喀斯特地区生态恢复重建的重要植被,目前对它的水分利用策略的研究较少。

本研究选取滇东南普者黑峰林湖盆区中云南松混交林与纯林为对象,通过测定降水、地表水、岩溶地下水、不同深度土壤水以及云南松茎干水中氢氧同位素值,结合 IsoSource 模型判定云南松的水分来源,测定植物叶片 ^{13}C 值用以比较植物 WUE,进而探究 2 种生长模式下云南松的水分获取以及水分竞争,阐明其在季节性干旱环境的水分利用策略,为深入研究岩溶区脆弱生态环境植被保护与恢复及水

源涵养林的选择提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇东南普者黑峰林湖盆区(103°58′—104°11′E, 24°5′—24°14′N),位于云南高原的东南缘,海拔 1 440~1 900 m,区内断陷盆地是滇东高原独特的蓄水型峰林湖盆的典型发育区^[28]。该区属于中亚热带季风气候,多年平均气温 16℃,多年平均降水量约 1 214 mm,降水丰富但季节分配不均^[11],5—10 月为雨季,降水占到全年的 70%左右,11 月至次年的 4 月为旱季,各月均降水量在 85 mm 以下,时常受到干旱威胁。该区植被基本由 1980 年以来人工种植的云南松纯林、自然恢复的常绿阔叶混交林构成,优势树种为云南松、清香木(*Pistacia weinmannifolia*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、锥连栎(*Quercus franchetii*)。植被多生长于石面、石沟、土坡、土面上。土壤主要是碳酸盐岩发育的灰棕色石灰土,质地较黏重,土层较薄,厚度在 0~80 cm,基岩裸露率较高,达 87%。在喀斯特的岩石层面裂隙发育,形成裸露型表层岩溶生态系统,表层岩溶地下水是当地生产生活的主要应用水源。由于岩溶带水在岩石裂隙中基本不受蒸发分馏的影响^[29],为此它与地下水有着相同或相似的同位素特征值^[30]。在盆地中部菜花箐村建立观测点采样样地,取样点分布及所选植株情况见表 1。

1.2 材料与方法

1.2.1 样品采集 在 2014 年 5 月—2015 年 4 月逐月选取较为稳定的晴天,进行每月 1 次的样品采集。收集大气降水、地下水、湖水、土壤水,根据其氢氧同位素值判定植物水分的具体来源及比例。在采样点附近高处放置雨水收集装置收集降水;收集样地旁菜花箐泉水以代替该区域地下水样品;采集菜花箐湖的湖水作为地表湖水样品;样地(20 m×20 m)内 5 种植株各自选取成熟生长旺盛且树高、胸径在林分平均水平的标准木,剪取 3 个阳面非绿色的栓化小枝。采集完全光照无遮阴条件且处林冠上层的成熟健康叶片^[9]。植物样品采集的同时采集土壤样品,土样的采集点设在所选植物冠幅内的树根附近,从地表 0~100 cm 的深度内,每 20 cm 为一层,

每层分别采取用于测定土壤含水量的铝盒样品和 30 g 同位素样品。所有水样、植物茎干、同位素土样,取样后迅速装入离心管中,冷藏保存至氢氧稳定同位素测定。

表 1 林地基本信息
Table 1 The basic information of forest plots

样地类型	样地面积 /m ²	优势树种	树种比例 /%	平均胸径 /cm	林分密度 /(株·hm ⁻²)	坡度 /(°)	基岩 裸露率/%	枯落物存量 /(t·hm ⁻²)
云南松混交林	20×20	云南松	32	12.6	5000	30	79	10.2
		清香木	28	9.12				
		锥连栎	14	9.44				
		香樟	8	12.46				
		滇青冈	18	11.4				
云南松纯林	20×20	云南松	100	29.9	3000	24	5	1.4

1.2.2 样品分析 植物茎干水和土壤水通过低温真空抽提法抽取。所有水样 δD 和 $\delta^{18}O$ 的值均在中国林业科学研究院稳定同位素实验室美国热电公司 DELTAV Advantage 同位素比率质谱仪和 Flash EA1112 HT 元素分析仪完成测定。 δD 和 $\delta^{18}O$ 的测量误差分别为 $\pm 0.3\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$,测得的水样同位素值采用标准平均大洋水 V-SMOW 标准校正。

$$\delta X(\text{‰}) = (R_{\text{sam}}/R_{\text{std}} - 1) \times 1\,000\text{‰} \quad (1)$$
式中, δX 为对应样品的氢氧同位素值, R_{sam} 为样品中元素的重轻同位素之比,如 $(D/H)_{\text{sample}}$ 和 $(^{18}O/^{16}O)_{\text{sample}}$, R_{std} 为国际通用标准物中元素的重轻同位素之比,如 $(D/H)_{\text{standard}}$ 和 $(^{18}O/^{16}O)_{\text{standard}}$ 。植物叶片 $\delta^{13}C$ 值在云南省高原地理过程与环境变化重点实验室,利用稳定同位素质谱仪 (IRMS-MAT253,美国)测定,精度为 0.15‰ 。其中,铝盒中土样置于 105°C 烘箱中烘干至恒重,测定土壤含水量,质量均用 Mettler toledo 生产的 AB104-S 天平测定,精度为千分之一。

1.2.3 数据处理 采用 Excel2010 和 Grapher10 进行统计分析和绘图。用 IsoSource 模型计算植被对各潜在水源的利用比例,计算时将 Increment 值设为 1% ,Tolerance 值设为 1‰ 。

2 结果与分析

2.1 土壤含水率及各潜在水源的情况

云南松混交林土壤含水率随土层深度的增加而逐渐递减,云南松纯林则呈现相反的递增趋势,随土层深度的增加土壤含水率逐渐增加,二者递减与递增的速率均是由 $20\sim 40$ 、 $40\sim 60$ 、 $60\sim 80$ cm 逐渐减小(图 1)。雨季旱季云南松混交林各个土层的土壤含水率均高于云南松纯林,随土层深度的增加二者土壤含水率的差异由大减小,且 $0\sim 60$ cm 的浅中层土壤含水率差异最大,旱季最大相差 10.36% ,雨季

最大相差 15.19% , $60\sim 80$ cm 深层土壤水差异减小,旱季和雨季土壤含水率分别相差 1.49% 和 0.44% 。二者在雨季 $0\sim 60$ cm 的浅中层土壤含水率差异较大,旱季 $60\sim 80$ cm 深层土壤水差异较大。总体而言,云南松混交林土壤含水量较高,土壤水分较充沛。

根据历次降水收集到的降水样求得研究区大气降水线 LMWL: $\delta D = 7.687\delta^{18}O + 11.296$ ($R^2 = 0.994, n = 12$) (图 2),雨季($5\sim 10$ 月) δD 与 $\delta^{18}O$ 值偏负,旱季(11 月至次年 4 月) δD 与 $\delta^{18}O$ 值偏正。岩溶地下水、土壤水、植物茎干水中的 δD 和 $\delta^{18}O$

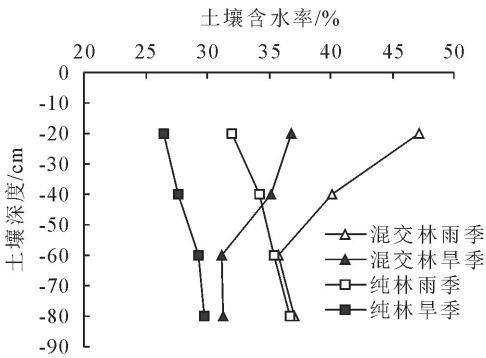


图 1 云南松混交林与纯林土壤含水率变化
Fig. 1 Comparison of soil water content in mixed and monocultured Pinus yunnanensis

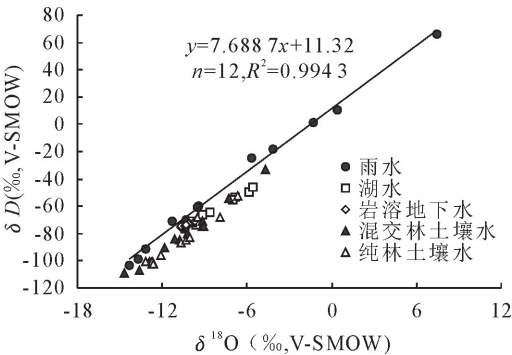


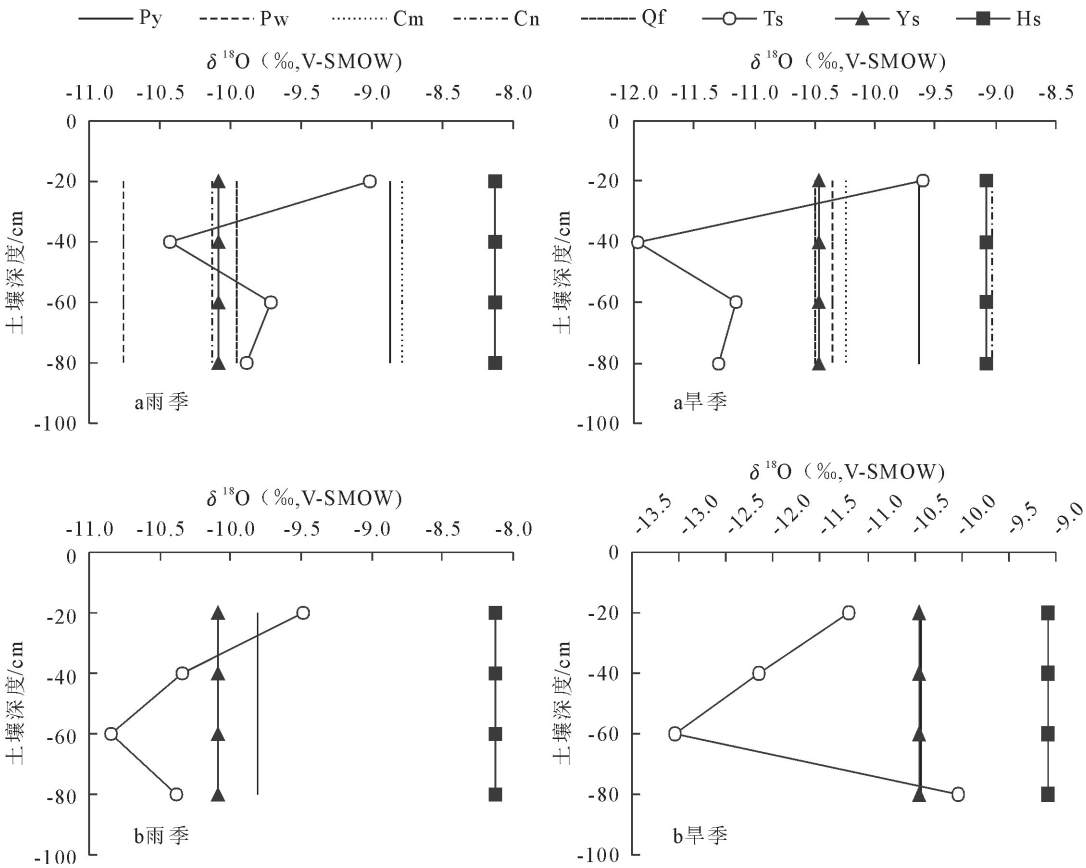
图 2 云南松林各潜在水源的 δD 、 $\delta^{18}O$ 组成关系
Fig. 2 δD and $\delta^{18}O$ compositions of potential water sources in *P. yunnanensis* forest

值均位于雨季降水线的左下方,其分布的斜率低于当地降水线,表明当地的水分来源于雨水。

2.2 云南松的水分利用来源

岩溶地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 旱雨季变化比较小,雨季的均值为 -10.08‰ ,旱季为 -10.46‰ ,表明其具有一定的稳定性和可靠性(图 3)。雨季 60~80 cm 深层土壤水与岩溶地下水的值较为接近,在 20~40 cm 中浅层有所交汇。混交林与纯林生境中云南松林旱雨季 $\delta^{18}\text{O}$ 值均在某一土层深度处出现极具波动,其深

度分别为 40 cm 和 60 cm,二者雨季 20 cm 深度处浅层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 -9.01‰ 和 -9.48‰ 与雨季降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 -9.49‰ 均较为接近,随土层深度的增加 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐递减,与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异拉大,为此这一深度有可能是雨水对两者补给的极限深度;而在降水较少的旱季云南松混交林,20~40 cm 浅层土壤水能够获得一部分岩溶地下水的补给,云南松纯林 60~80 cm 深层土壤水能够获得岩溶地下水的补给。



注:a:云南松混交林;b:云南松纯林。下同。Py:云南松;Pw:清香木;Cm:香樟;Cn:滇青冈;Qf:锥连栎;Ts:土壤水;Ys:岩溶地下水;Hs:湖水。

图 3 旱雨季云南松茎秆水与土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化

Fig. 3 The variation of stem water and soil water $\delta^{18}\text{O}$ in *P. yunnanensis* during drought and rainy seasons

雨季不同植物的水分来源存在较大的差异。云南松混交林不同类型植物茎干水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在较大差异,水分竞争相对较小。如图 3a,云南松与香樟的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -8.87‰ 、 -8.79‰ ,与浅层土壤水和地表水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 -9.01‰ 、 -8.12‰ 较为接近,表明 2 种植物所利用的水分大部分来源于浅层土壤水和地表水。滇青冈与锥连栎的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.13‰ 、 -9.96‰ ,与岩溶地下水 and 中层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 -10.08‰ 、 -10.07‰ 比较接近,表明这 2 种植物主要利用岩溶地下水 and 中层土壤水。清香木茎干水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.8‰ ,较为偏负与其他树种具有较大差异。云南松纯林,植被较为单一,水分

利用来源较混交林竞争要大些(图 3b)。云南松茎干水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -9.80‰ ,与浅层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 接近,则主要利用浅层土壤水和降水。

旱季云南松混交林中(图 3a),云南松茎干水的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -9.6‰ ,与浅层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值一致,其主要水源则为浅层土壤水。滇青冈的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 -9.03‰ 与地表水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 -9.08‰ 接近。清香木、香樟、锥连栎 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负,同位素值分别为 -10.35‰ 、 -10.25‰ 、 -10.50‰ 与岩溶地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 接近。旱季混交林中并未显示出强烈的水分竞争。图 3b 中,纯林中云南松茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值几乎与表层岩溶带水 $\delta^{18}\text{O}$ 值重合,与 80 cm 深层土壤水出

现交集,可见旱季纯林云南松主要利用深层土壤水和岩溶地下水。植被类型单一,同种植被之间在水源使用上竞争较大,不利于云南松的生存。

2.3 云南松的水分利用比例

通过 Isosource 模型计算得出 2 种恢复模式下不同水分来源对云南松等植被的贡献比例(图 4)。在雨季植被多倾向于利用 20~40 cm 中浅层土壤水、降水和湖水。混交林中,地表湖水及 20 cm 浅层土壤水对云南松和香樟的贡献比例较高,分别为 46.4%、17.6% 和 51.9%、15.8%。锥连栎与滇青冈对 40 cm 深度土壤水的利用比例最高为 45.5%、63.1%。纯林云南松没有特别突出的利用比例,对降水及 20 cm 土壤水利用比例较其他水分来源偏高,均为 19.5%。雨季 2 种恢复模式中都对降水及浅层水分吸收利用比例增加。

在降水较少的旱季,混交林云南松植株水分的主要来源依旧是地表湖水和 20 cm 浅层土壤水,利用比例为 55.5%、21.8%。而香樟、清香木的水分利用来源几乎相似,均对 20 cm 土壤水分利用比例最高 24%、21.9%,对湖水的利用比例次之 23.8%、20.7%。锥连栎对岩溶地下水的利用比例最高为 20.1%,对其他水分来源的利用比例差异不是很大。纯林中云南松对岩溶地下水 and 80 cm 深度处的深层土壤水的利用较高,分别为 26.7%、24%。总体而言,混交林中由于林型、林龄和根系分布的不同,使得植被对于水分的利用类型倾向于多样化,从而一定程度上避免了干旱季节激烈的水分竞争;云南松纯林水分利用较为集中,水分来源竞争激烈,极有可能导致云南松早衰。

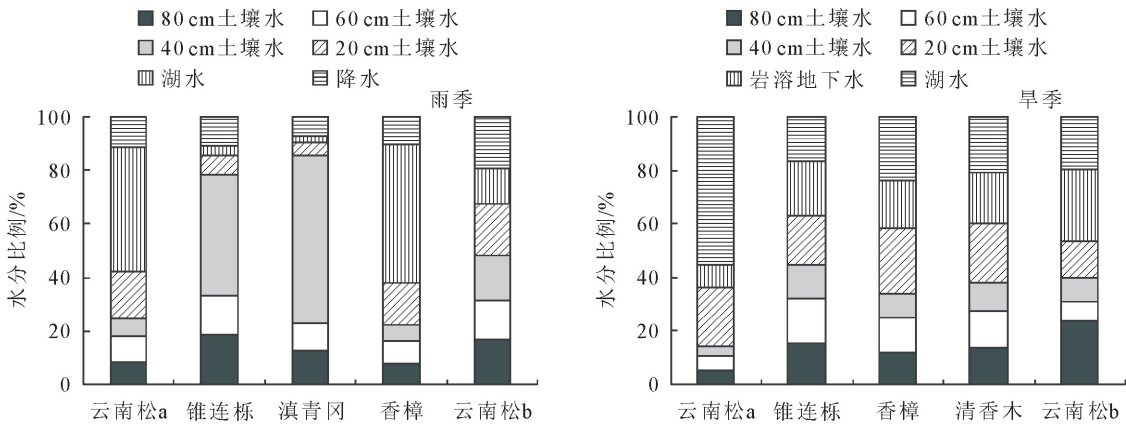


图 4 云南松及混交林中代表性植物对各可能水源的利用比例

Fig. 4 The utilization ratio of representative vegetation in mixed forest and *P. yunnanensis* to each possible water source

2.4 云南松的水分利用效率

喀斯特地区水是植物生长的限制性因子,加上降水的不稳定性,不同季节降水、土壤水含量等有较大差异,植物响应程度也各有不同。由表 2 可以看出,雨季云南松混交林各植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要在 $-31.87\text{‰} \sim -27.66\text{‰}$ 范围浮动,其平均值为 -29.91‰ ,云南松纯林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -28.48‰ ,二者对比表明雨季云南松纯林植物叶片

$\delta^{13}\text{C}$ 值略大于混交林,说明 $\text{WUE}_{\text{纯林}} > \text{WUE}_{\text{混交林}}$ 。旱季云南松混交林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值则主要分布于 $-30.07\text{‰} \sim -27.58\text{‰}$,平均值为 -29.44‰ ,高于雨季;云南松纯林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -31.67‰ ,低于雨季和同期混交林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,表明其水分利用效率较雨季降低。纯林中同种植被的用水模式较为单一,在本就缺水的旱季使得云南松受到更为严重的水分胁迫。

表 2 2 种恢复模式内不同树种的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Table 2 The leaf $\delta^{13}\text{C}$ value of different recovery modes in two forest types

季节	树种								
	Qa-1	Qa-2	Ga-1	Ga-2	Wa-1	Wa-2	Ca	Pa	Pb
雨季	-31.87	-30.95	-29.63	-31.10	-29.35	-29.09	-29.66	-27.66	-28.48
旱季	-27.58	-29.85	-29.86	-27.58	-30.07	-29.37	-29.47	-29.56	-31.67

注:Qa-1:锥连栎 DBH=8.28 cm;Qa-2:锥连栎 DBH=12.18 cm;Ga-1:滇青冈 DBH=8.22 cm;Ga-2:滇青冈 DBH=17.21 cm;Wa-1:清香木 DBH=8.28 cm;Wa-2:清香木 DBH=12.42 cm;Ca:香樟 DBH=21.44 cm;Pa:混交林云南松 DBH=18.84 cm;Pb:纯林云南松 DBH=19.18 cm。

3 结论与讨论

3.1 结论

稳定氢氧同位素研究结果显示,降水、土壤水、地表湖水及岩溶地下水均属同一变化趋势,表明地处亚热带季风气候区的滇东南岩溶山地区降水丰沛,土壤水、地表湖水及岩溶地下水均来源于雨水,而土壤水和表层岩溶带水是植物主要的水分来源。

不同恢复模式和季节中云南松的水分利用策略不同。早雨季混交林中的云南松都能够得到稳定的水源供给,不用因为季节的变化而变动,纯林中云南松因水分竞争较为激烈,必须随着季节的变化而进行不同的水分利用方式,才有利于度过缺水的干旱季节。2种恢复模式中云南松混交林的水分利用效率早季的高于雨季,这样更有利于帮助植被度过干旱,且在早雨季都是混交林中的云南松的水分利用效率要高于纯林中的云南松。

根据不同恢复模式云南松水分利用策略的研究,云南松与一些常绿乔木树种(滇青冈、香樟、锥连栎、清香木)的混交是滇东南岩溶山地水源涵养功能恢复的最佳物种组合方式,且混交林内植物结构丰富,不同树种水分利用方式不同,使得种间水分利用竞争力降低,土壤保水能力好,体现了更好的水文生态环境。

3.2 讨论

3.2.1 土壤含水量 植物小枝的 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素与不同水源的关系分析得出,喀斯特植物茎干水、土壤水及岩溶地下水的衰减趋势相似,表明当地水分来源于雨水且土壤水及岩溶地下水均是植物的可靠水源。降水是土壤水的直接来源^[16]。土壤水是植物最直接最主要的水分来源,但喀斯特地区石漠化严重,土壤储水量低。云南松混交林中,在早季和雨季 20~40 cm 浅层土壤水分能够接近 40%、50%,土壤含水率由表层向下逐渐递减,至 60 cm 土层含水率又有所缓慢回升。纯林中土壤含水率各土层在早雨季均<混交林,其由浅层向下呈递增趋势,深层含水率早雨季最高达 29%、36%。云南松混交林中植物种类丰富,植被覆盖率高,并且凋落物的输入量也较纯林要大。此外,植被覆盖以及林下凋落物能作为防风层减少土壤水分蒸发,这也是影响土壤含水量的一个重要因素^[16,31]。因此,混交林内土壤水分蒸发会减少,林下植被以及凋落物等对地表径流的截流,雨水、雾水的凝结能力比云南松纯林要更强,土壤含水条件会更好^[32-33]。

3.2.2 氢氧稳定同位素与植物水分来源 综合植物茎干水稳定同位素值与土壤水分等相关水源的对

应关系,发现滇东南岩溶山地不同群落植被恢复中水分利用存在明显的差异。云南松混交林无论在雨季还是旱季,岩溶地下水都一直作为植被稳定的水源供给。雨季云南松、香樟等植被主要利用由降水补给形成的湖水和 20 cm 左右的浅层土壤水。滇青冈、锥连栎的 $\delta^{18}O$ 值 -10.13、-9.96,均与岩溶地下水的 $\delta^{18}O$ 值 -10.08 较为接近,且二者对 40 cm 左右中层土壤水的利用比例也都在 50%左右,表明雨季岩溶地下水及浅中层土壤水是其主要水分来源。可见混交林中植被水分来源的多样化,也有类似研究表明,混交式林内不同树种之间的竞争使得一些树种为避免与其他树种的竞争而形成互补的水分利用模式,有利于根系向更深处发展^[16]。在雨季,雨水补给表层土壤水,植被增加对表层土壤水的利用比例^[34]。纯林中云南松主要利用 20 cm 浅中层土壤水及降水,二者所占比例接近 40%。由于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^[35],同种植物水分来源相似也使得植被水分竞争压力加大。

旱季混交林中,云南松主要通过其发达的侧根系加大对附近湖水的利用比例,占整个水分来源的 50%以上,20 cm 浅层土壤水贡献比例占到 21.8%。喀斯特不同生活型广布植物种均以浅根系为主要特征,植物最大根幅远大于最大根系深度^[36]。云南松根系较深,但约 93%的根系生物量集中分布在 0~30 cm 土层中,深土层(30~115 cm)的根系生物量占 7%左右。因此云南松的水分利用模式与其根系有着巨大的关系。滇青冈 $\delta^{18}O$ 的值缩小至 -9.03,与地表湖水的 $\delta^{18}O$ 值 -9.08 基本相当,增加了对湖水的利用比例。香樟、锥连栎、清香木则均加大了对岩溶地下水的利用,比例接近 20%。而土壤水分的贡献比例则主要集中在 20 cm 左右的浅土层。其原因可能是锥连栎、香樟、清香木等植物的深层根将其所在的深层土壤中吸收的水分传输到浅层土壤中,供云南松及其他浅根植物使用,出现植物水分再分配^[37],也可能与植物的双根系分布有关。在混交林中物种丰富导致的竞争使得植物产生 2 种类型的适应策略:增强竞争能力和减少竞争交互^[38]。不同种植生长模式下云南松对不同水分的利用比例有所不同^[39]。云南松纯林中,云南松的水分利用具有明显的季节差异性,旱季降水偏少,浅中层土壤水分也随之减少,为了度过干旱季节,云南松增加对 80 cm 左右的深层土壤水和表层岩溶带水的吸收。云南松纯林植被类型单一,水分利用比较集中,造成竞争较为激烈,不利于云南松应对可能出现的水分胁迫。

云南松混交林中植被对各深度土壤水分的利用比例相差不是特别的大,季节波动也较纯林要小,对地下岩溶水的利用比例也较纯林要大。

3.2.3 不同恢复模式下云南松水分利用效率 从世界各地看植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,热带地区的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-32.10\text{‰} \sim -31.60\text{‰}$,亚热带为 $-31.10\text{‰} \sim -30.50\text{‰}$,温带为 $-29.50\text{‰} \sim -26.20\text{‰}$ ^[40]。本研究区虽处亚热带地区,但植物碳同位素值要略低于世界其他亚热带植物,在研究区内混交林植物 $\delta^{13}\text{C}$ (均值 -29.675‰) 高于纯林植物 $\delta^{13}\text{C}$ (均值 -30.075‰)。相同植物种生长在 2 种不同生境上其 $\delta^{13}\text{C}$ 值会存在差异^[27]。与中国其他喀斯特地区相比,云南松混交林高于广西弄岗喀斯特季雨林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值 ($-31.40 \pm 1.19\text{‰}$),但低于云南西双版纳热带雨林植物 (均值 -33.11‰)^[33,41] 和相似纬度的广西西部北部喀斯特森林 (均值为 -29.01‰) 及贵州亚热带喀斯特森林 (均值为 -28.14‰)^[27,42],这可能与植物生长环境有关。土壤水分条件与植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE 关系十分密切,植物所处生境的水分可利用性越低,植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE 越高^[43]。这有可能说明此研究区的土壤水较广西、贵州喀斯特地区土壤水要丰富一些。土层厚度、土壤养分、林分郁闭度等生境条件会对植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响^[27]。研究区中旱季云南松混交林的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于云南松纯林,这也说明在水分受到胁迫的情况下,混交林的竞争力要强。混交林中针叶树与一部分落叶树种组合而成,为适应不利环境,落叶植物在旱季逐步落去叶片,以减少蒸发抵御干旱,增加土壤养分^[44]。土壤厚度和盖度越低,岩石裸露度和日照指数越高,地形湿润指数就越低,不利于水分的涵养与保持^[45]。因此,在进行喀斯特生态恢复与治理时,应选择混交林这种在脆弱环境下具有较强竞争力的种植模式。

参考文献:

[1] 王晓丽,李文静,张志强,等. 渗透胁迫对云南松幼苗生物量及碳酸酐酶的影响[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):10-15.
WANG X L, LI W J, ZHANG Z Q, *et al*. Affects of osmotic stress on the biomass and carbonic anhydrase of *Pinus yunnanensis* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2):10-15. (in Chinese)

[2] 王健敏,刘娟,陈晓鸣,等. 云南松天然林及人工林群落结构和物种多样性比较[J]. 林业科学研究,2010,23(4):515-522.

[3] 佟志龙,陈奇伯,王艳霞,等. 不同林龄云南松林营养元素积累与分配特征研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(6):100-106,114.
TONG Z L, CHEN Q B, WANG Y X, *et al*. Accumulation and distribution characteristics of nutrients in *Pinus yunnanensis*

forests with different ages[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(6):100-106, 114. (in Chinese)

[4] 高成杰,唐国勇,刘方炎,等. 林分结构调整对云南松次生林生长和土壤性质的影响[J]. 林业科学研究,2017,30(5):841-847.
GAO C J, TANG G Y, LIU F Y, *et al*. Effects of stand structural adjustment on growth and soil properties of *Pinus yunnanensis* secondary forest[J]. Forest Research, 2017, 30(5):841-847. (in Chinese)

[5] 蔡年辉,李根前,束传林,等. 云南松天然林区植物群落结构的时空动态研究[J]. 西北植物学报,2006,26(10):2119-2124.
CAI N H, LI G Q, SHU C L, *et al*. Spatial dynamics of plant community structures in natural *Pinus yunnanensis* forest region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(10):2119-2124. (in Chinese)

[6] 蔡年辉,李根前,朱存福,等. 云南松人工林与天然林群落结构的比较研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(2):1-4,163.
CAI N H, LI G Q, ZHU C F, *et al*. A comparison study on the community structure between artificial and natural forests of *Pinus yunnanensis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(2):1-4, 163. (in Chinese)

[7] 邓喜庆,皇宝林,温庆忠,等. 云南松林资源动态研究[J]. 自然资源学报,2014,29(8):1411-1419.

[8] 李愿会. 川西南高原云南松林直径分布研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(3):219-225.
LI Y H. Studies on diameter distribution of *Pinus yunnanensis* forest in plateaus of sw-Sichuan Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3):219-225. (in Chinese)

[9] 李莲芳,韩明跃,郑晚,等. 云南松低质低效林的成因及其分类[J]. 西部林业科学,2009,38(4):94-99.

[10] 杨超本,郭汝平,马自芬,等. 滇中地区退化云南松林分质量恢复技术[J]. 林业科技通讯,2015(12):17-19.

[11] 丁亚丽,陈洪科,聂云鹏,等. 基于稳定同位素的喀斯特坡地尾巨桉水分利用特征[J]. 应用生态学报,2016,27(9):2729-2736.

[12] 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 (Amsterdam), 2007, 342(3/4):238-248.

[13] SCHWINNING S. The water relations of two evergreen tree species in a Karst savanna[J]. Oecologia, 2008, 158(3):373-383.

[14] REN H. A review on the studies of desertification process and restoration mechanism of Karst rocky ecosystem[J]. Tropical Geography, 2005, 25(3):195-200.

[15] 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.

[16] 曾欢欢,刘文杰,吴骏恩,等. 西双版纳地区丛林式橡胶林内植物的水分利用策略[J]. 生态学杂志,2019,38(2):394-403.

[17] FAN T, LI J, LI Y, *et al*. Stable isotopic study on water utilization sources of *Pinus yunnanensis* plantations in the central Yunnan Karst Plateau [J]. Advanced Materials Research,

2013,726-731;3888-3893.

[18] DAWSON T E,MAMBELLI S,PLAMBOECK A H,*et al.* Stable isotopes in plant ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics,2002,33:507-559.

[19] BERT D,DUPOUEY L J L . Variations of wood $\delta^{13}\text{C}$ and water-use efficiency of abies alba during the last century[J]. Ecology,1997,78(5):1588-1596.

[20] 李机密,黄儒珠,王健,等. 陆生植物水分利用效率[J]. 生态学杂志,2009,28(8):1655-1663.

[21] 张鑫生,闫飞,王宗玮,等. $\delta^{13}\text{C}$ 同位素判别技术在评价植物水分利用效率中的应用[J]. 吉林农业科学,2009,34(4):17-20.

[22] NIPPERT J B,KNAPP A K. Soil water partitioning contributes to species coexistence in tallgrass prairie [J]. Oikos, 2007,116(6):1017-1029.

[23] JOSÉ IGNACIO QUEREJETA,HÉCTOR ESTRADA-MEDINA,MICHAEL 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.

[24] 黄甫昭,李冬兴,王斌,等. 喀斯特季节性雨林植物叶片碳同位素组成及水分利用效率[J]. 应用生态学报,2019,30(6):1833-1839.

HUANG F Z,LI D X,WANG B,*et al.* Foliar stable carbon isotope composition and water use efficiency of plant in the Karst seasonal rain forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(6):1833-1839. (in Chinese)

[25] 聂洪鹏,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.

[26] 容丽,王世杰,俞国松,等. 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 L,WANG S J,YU G S,*et al.* Stable isotope analysis of water sources of four woody species in the Libo Karst forest[J]. Scientia Silvae Sinicae,2012,48(7):14-22. (in Chinese)

[27] 杨成,刘丛强,宋照亮,等. 喀斯特山区植物碳同位素组成特征及其对水分利用效率的指示——以贵州花溪杨中小流域为例[J]. 中国岩溶,2007,26(2):105-110.

[28] 尹继清,范弢,晏朋. 滇东南峰林湖盆区表层岩溶泉水化学动态变化分析[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(5):747-754.

[29] QUEREJETA J I,ESTRADA-MEDINA H,ALLEN M F,*et al.* Utilization of bedrock water by *Brosimum alicastrum* trees growing on shallow soil atop limestone in a dry tropical climate[J]. Plant and Soil,2006,287(1/2):187-197.

[30] 刘自强,余新晓,娄源海,等. 北京山区侧柏水分利用策略[J]. 生态学报,2017,37(11):3697-3705.

LIU Z Q,YU X X,LOU Y H,*et al.* Water use strategy of *Platycladus orientalis* in Beijing mountainous area[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3697-3705. (in Chinese)

[31] SODERBERG K,GOOD S P,WANG L,*et al.* Stable isotopes of water vapor in the vadose zone:a review of measurement and modeling techniques[J]. Vadose Zone Journal,2012,12:215-228.

[32] LIU W J,ZHANG Y P,LI H M, *et al.* Fog drip and its relation to groundwater in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, southwest China: a preliminary study [J]. Water Research,2005,39:787-794.

[33] 卢洪健,刘文杰,罗亲普. 西双版纳山地橡胶林凋落物的生态水文效应[J]. 生态学杂志,2011,30(10):2129-2136.

[34] DUAN D Y,OUYANG H,SONG M H,*et al.* Water sources of dominant species in three alpine ecosystems on the Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2008,50:257-264.

[35] SCHENK H J,JACKSON R B. The global biogeography of roots[J]. Ecological Monographs,2002,72(3):311-328.

[36] NIE Y P,CHEN H S,WANG K L,*et al.* Rooting characteristics of two widely distributed woody plant species growing in different Karst habitats of southwest China[J]. Plant Ecology,2014,215(10):1099-1109.

[37] 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.

[38] GRIME J P. Plant strategies,vegetation processes, and ecosystem properties [J]. Journal of Vegetation Science, 2002,13:294.

[39] WU J E,LIU W J,CHEN C F. How do plants share water sources in a rubber-tea agroforestry system during the pronounced dry season? [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2017,236:69-77.

[40] 容丽,王世杰,杜雪莲. 贵州花江峡谷区常见乔灌木植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对喀斯特石漠化程度的响应[J]. 林业科学,2007,43(6):38-44.

[41] 渠春梅,韩兴国,苏波,等. 云南西双版纳片断化热带雨林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的特点及其对水分利用效率的指示[J]. 植物学报,2001,43(2):186-192.

QU C M,HAN X G,SU B,*et al.* The characteristics of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plants and plant water use efficiency indicated by $\delta^{13}\text{C}$ values in two fragmented rainforests in xishuangbanna,Yunnan[J]. Journal of Integrative Plant Biology,2001,43(2):186-192. (in Chinese)

[42] 谭巍,陈洪松,王克林,等. 桂西北喀斯特坡地典型生境不同植物叶片的碳同位素差异[J]. 生态学杂志,2010,29(9):1709-1714.

[43] XU X,GUAN H D,SKRZYPEK G G,*et al.* Response of leaf stable carbon isotope composition to temporal and spatial variabilities of aridity index on two opposite hillslopes in a native vegetated catchment [J]. Journal of Hydrology, 2017, 553: 214-223

[44] 熊红福,王世杰,容丽,等. 极端干旱对贵州省喀斯特地区植物的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(5):1127-1134.

[45] GUO Y L,WANG B,MALLIK A U,*et al.* Topographic species-habitat associations of tree species in a heterogeneous tropical Karst seasonal rain forest,China[J]. Journal of Plant Ecology,2017,10:450-460.