

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201406030

吴骏恩, 刘文杰. 西双版纳地区不同胶农(林)复合系统的植物水分利用效率比较 [J]. 广西植物, 2016, 36(7): 859–867

WU J E, LIU W J. Comparing the water use efficiency of plants in different types of rubber-based agroforestry ecosystem in Xishuangbanna, Southwest China [J]. Guihaia, 2016, 36(7): 859–867

西双版纳地区不同胶农(林)复合系统的 植物水分利用效率比较

吴骏恩^{1,2}, 刘文杰^{1*}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南 勐仑 666303; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 当前, 西双版纳地区大面积橡胶单一种植林已引发了诸多的生态环境问题, 为解决这些问题同时协调当地的经济发展, 农林复合系统被生态学者们认为是最好的解决办法。然而目前关于不同间作模式下橡胶树水分利用效率研究还很少。因此, 于 2013–2014 年的雨季中期(8 月)和末期(11 月)、雾凉季(1 月)、干热季(3 月), 分别测定了中国科学院西双版纳热带植物园内四种不同胶农(林)复合系统(橡胶—叶茶、橡胶—咖啡、橡胶—大叶千斤拔、橡胶—可可复合系统)及单层橡胶林的土壤含水量、橡胶树及其林下间作植物的枝条凌晨水势和正午水势, 以及它们植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 分析了各胶农(林)复合系统内橡胶树的水分利用效率, 以期遴选出水分关系配置合理的复合橡胶林栽培模式, 为环境友好型橡胶种植林建设和推广提供相关的参考依据和理论支持。结果表明: 除橡胶—可可复合系统以外, 其余胶农(林)复合系统内的橡胶树水分利用效率值均高于单层橡胶林; 橡胶—大叶千斤拔复合系统的土壤含水量显著高于其它复合系统; 橡胶—叶茶复合系统的土壤含水量虽然低于橡胶—大叶千斤拔复合系统, 但其最为稳定、季节变化小; 橡胶—咖啡复合系统的水分利用效率最高最稳定, 即使受到寒害也没有引起明显变化; 而橡胶—可可复合系统的作用不明显, 所有特征都与单层橡胶林相似。这表明除了橡胶—可可复合系统外, 其他 3 种胶农(林)复合系统都显著地缓解了橡胶树在旱季所遭受的水分胁迫, 同时也能有效地抵御突发性天气灾害。

关键词: 农(林)复合系统, $\delta^{13}\text{C}$, 橡胶树, 土壤含水量, 水势, 水分利用效率

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2016)07-0859-09

Comparing the water use efficiency of plants in different types of rubber-based agroforestry ecosystem in Xishuangbanna, Southwest China

WU Jun-En^{1,2}, LIU Wen-Jie^{1*}

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A huge area of rubber (*Hevea brasiliensis*) monoculture in Xishuangbanna, Southwest of China have caused many ecological and environmental problems now. In order to coordinate these problems and local economic

收稿日期: 2014-12-23 修回日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(31570622, 41271051, 31170447); 云南省应用基础研究重点项目(2013FA022, 2014HB042); XTBG-T03 项目 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31570622, 41271051, 31170447); Yunnan Key Program of Application Fundamental Research (2013FA022, 2014HB042); XTBG-T03 Project].

作者简介: 吴骏恩(1990-) 男, 云南省昭通人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为生态水文 (E-mail) wujunen@xtbg.cn; Symbol@ac.cn.

* 通讯作者: 刘文杰, 博士, 研究员, 主要从事生态水文研究 (E-mail) lwj@xtbg.org.cn.

development, agroforestry ecosystem as ecologists' common advise has been considered the best way to solve above problems. However, little information about rubber's water use efficiency is known in different agroforestry ecosystems. For this reason, we measured soil water content, the shoot predawn and midday water potential, and the leaf $\delta^{13}\text{C}$ of *Hevea brasiliensis* as well as its interplant in four rubber-based agroforestry ecosystems (*Hevea brasiliensis*—*Theobroma cacao* agroforestry ecosystem, *Hevea brasiliensis*—*Camellia sinensis* agroforestry ecosystem, *Hevea brasiliensis*—*Coffea arabica* agroforestry ecosystem, *Hevea brasiliensis*—*Flemingia macrophylla* agroforestry ecosystem) and one rubber monoculture which was located at Xishuangbanna Tropical Botanical Garden in Southwest Yunnan Province, China in August 2013 (rainy season), November (conversion of the rainy and dry seasons) 2013, January 2014 (foggy season) and March 2014 (pronounced dry season). We aimed to apply stable carbon isotopes techniques in the study of the water use efficiency of *Hevea brasiliensis* in those rubber-based agroforestry ecosystems, and thus to select optimal agroforestry ecosystems which can use water reasonably and effectively. Depending on the multivariate statistical analysis, the results were as follows: (1) The average leaf $\delta^{13}\text{C}$ of *Hevea brasiliensis* in those agroforestry ecosystems (except for *Hevea brasiliensis*—*Coffea arabica* agroforestry ecosystem) were higher than that in rubber monoculture; (2) The soil water content in *Hevea brasiliensis*—*Flemingia macrophylla* agroforestry ecosystem was always higher than others during the research period ($P < 0.01$); (3) Despite the soil water content of *Hevea brasiliensis*—*Camellia sinensis* agroforestry ecosystem was the second highest, but it was the most stable one which change small with season; (4) The water use efficiency of *Hevea brasiliensis*—*Coffea arabica* agroforestry ecosystem was the most stable, and it was the highest one in despite of the chilling injury at the end of 2014; (5) As well as the rubber monoculture, *Hevea brasiliensis*—*Theobroma cacao* agroforestry ecosystem did not play a significant role during the whole period, and it expressed many characteristics like the rubber monoculture. All above results indicated that the agroforestry ecosystem (except *Hevea brasiliensis*—*Coffea arabica* agroforestry ecosystem) could alleviate the water stress suffered by *Hevea brasiliensis* in the pronounced dry season. Not only could they keep higher growth and yield than rubber monoculture, but they also could make sure that the *Hevea brasiliensis* can resist the burst weather disaster at the same time. The results provides the relative theory and reference to support and guide the construction of environmentally-friendly rubber plantation.

Key words: agroforestry ecosystem, $\delta^{13}\text{C}$, *Hevea brasiliensis*, soil water content, water potential, water use efficiency

半个世纪前,西双版纳还拥有着成片物种丰富、生机勃勃的原始热带雨林,但随着国际上对天然橡胶需求的增加,受经济利益的驱动,当地原始林被大量开垦为橡胶林。根据 Li et al (2007) 的研究,1950 年西双版纳开始种植橡胶,1976 年种植面积为 249 km^2 ,但到了 2003 年已增加至 2 256 km^2 ,不到 30 年橡胶林面积就由 1.1% 剧增到 11.3%,而原始雨林覆盖面积由 1976 年的 70% 降至 2003 年不足 50%。

橡胶树的这种违背了生物生态学原理,大面积单一种植模式带来了诸多环境问题,如生物多样性降低(李维锐等,2009)、区域水资源短缺、土壤恶化、水土流失严重(Liu et al, 2013)、病虫害加剧以及农药、化肥、除草剂等化学药品带来的进一步的环境污染问题。同时,该地区干季(11 月至次年 4 月)降雨量极少,这就使得作为外来引种植物的橡胶需要忍受长时间的干旱胁迫,且还可能遭受到在越冬期出现的寒害,造成巨大的经济损失。所以,面对当今全球气候和环境变化带来的极端天气气候事

件,同时为协调橡胶林种植与原始热带雨林保护的问题,以及解决橡胶单一种植带来的诸多环境问题,中国科学院西双版纳热带植物园在该地区构建了多种胶农(林)复合系统。这种利用不同物种间生态互补功能所构建的群落系统,不仅可以充分地利用水肥光热资源、增加养分的吸收利用率,提高系统生产力,而且还能减缓水土流失、维持局部气候的稳定、提高生物多样性(庞家平等,2009)。这作为一种可持续的土地利用方式,被很多科学家认为是解决上述问题最有效的手段(Dea et al, 2001; Rodrigo et al, 2004; Schroth et al, 2004)。经过多年的研究,有的学者已经找到适合与橡胶树间作的经济作物,如甘蔗(Pinto et al, 2005)、香蕉(Rodrigo et al, 1997)、咖啡和可可(Snoeck et al, 2013)、大叶茶(冯耀宗,2007)等。

然而,目前对农林复合系统生态功能的研究尚未深入(陈鹏等,2010),仍然缺乏系统和准确的认知,尤其是在水分利用方面,并非所有农林复合系统

的设计都是合理的。在本地区,哪些胶农(林)复合系统水保持较好?哪些胶农(林)复合系统可以有效地应对橡胶树在干季所遭受到的水分胁迫?各个胶农(林)复合系统内植物的水分利用模式有何差别?这些问题对于改造西双版纳地区现存的大面积单层橡胶林来说是急需迫切解答的。为此,本研究选择了中国科学院西双版纳热带植物园内的四类胶农(林)复合系统以及单层橡胶林为研究样地,通过测量植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 来观察橡胶树在不同季节、不同胶农(林)复合系统内的长期水分利用效率(WUE)的差异,同时还测量了各样地的土壤含水量以及植物枝条的凌晨水势 Ψ_{pd} 和正午水势 Ψ_{md} ,旨在揭示相同环境下、不同胶农(林)复合系统内各植物的水分胁迫状况,以期遴选水分关系配置合理的复合橡胶林栽培模式。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样地概况

西双版纳州地处北回归线以南,位于中国的西南部,属热带的北部北缘,地理位置为 $21^{\circ}09' \sim 22^{\circ}33' \text{N}$ 、 $99^{\circ}58' \sim 101^{\circ}50' \text{E}$ 。受西南季风的影响,一年中有3个明显的季节划分:雾凉季(11月至次年2月)、干热季(3~4月)和雨季(5~10月)。年均降雨量为1400~1500 mm,雨季降雨量占全年降雨量超过80%,干季降雨量少;年均气温 21.4°C ,相对湿度85%。年均有雾日数为173.7 d,终年无霜。土壤为砖红壤,土层深厚。

本次调查选取位于中国科学院西双版纳热带植物园内的橡胶—可可(*Theobroma cacao*)、橡胶—叶茶(*Camellia sinensis*)、橡胶—咖啡(*Coffea arabica*)、橡胶—大叶千斤拔(*Flemingia macrophylla*)胶农(林)复合系统为研究样地(以下简称为胶—可、胶—茶、胶—咖和胶—千复合系统),同时选取位于植物园内新开地1990年(同年)定植的单层橡胶林(*Hevea brasiliensis*)为对照研究样地,一共五种胶园。橡胶树的种植采取的是宽行双株的方式,种植规格为 $2 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} \times 14 \text{ m}$,即采用窄(4.5 m),宽(14 m)间隔种植。在胶农(林)复合系统中,橡胶树宽行距之间种植间作植物,间作植物与橡胶树相隔1 m左右,其中叶茶的种植规格为 $0.6 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,咖啡的种植规格为 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,可有的种植规格为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,大叶千斤拔的种植规格为 $0.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。所有

样地均属坡向为 $85^{\circ} \sim 94^{\circ}$ 的台地,坡度在 $29^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 之间,面积 $< 0.3 \text{ hm}^2$,各样地相距 $< 1 \text{ km}$,海拔高度一致。各样地以正常生长的1棵橡胶树及其窄行距和半宽行距范围内(即 $4.5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$)的间作植物为一个调查小区。

1.2 植物叶片枝条水势的测定

分别在2013年8月(雨季中期)、11月(干季初期)、2014年1月(雾凉季)、3月(干热季)选择天气状况良好且稳定的一天用 Pump-Up 无气瓶植物压力室(Pump-Up, PMS Instrument Company, USA)测定植物叶片的枝条凌晨水势(Ψ_{pd})和正午水势(Ψ_{md}),凌晨水势(Ψ_{pd})测定时间为4:00~6:00,正午水势(Ψ_{md})测定时间为12:00~14:00。各样地分别选择三个调查小区,每一小区对各树种选择1到2个枝条,剪下后立即进行测量记录。

1.3 植物叶片的采集及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定

在测定植物叶片枝条正午水势(Ψ_{md})的同时采集各树种足量的健康叶片置于信封内,带回实验室,用烘箱 105°C 杀青1 h后调整为 80°C 烘干24 h,再用粉碎机粉碎,过80目筛后制成供试样品,封存于密封塑料袋内放入干燥箱内保存。最后用稳定同素质谱仪(IsoPrime100, UK)以PDB(Pee Dee Bel-emnite)为标准测定的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$,再用以下公式进行计算(Fry, 2006): $\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$

式中 $\delta^{13}\text{C}$ 为对应样品的碳同位素值, R_{sample} 和 R_{standard} 分别为样品和国际通用标准物中元素的重轻同位素丰度之比(即 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)。

1.4 土壤含水量的测定

在测定植物叶片枝条水势的同一天上午,用土钻法采集土壤样品。选择各样地橡胶树及其间作植物之间地势相对均一的地方,钻取0~110 cm(即表层土壤到作物根系穿插边界)的土壤,每个样地各取3次,用烘干法测量其土壤含水量。其公式为土壤含水量 = (鲜土质量 - 干土质量) / 干土质量 $\times 100\%$ 。同时,在林外空旷处采用雨量传感器(3554WD1, Spectrum Technologies Inc., USA)连续记录大气降雨量。

1.5 数据分析

用SPSS统计软件对土壤含水量、植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 Ψ_{pd} 和 Ψ_{md} 之间的差异采用两因素方差分析,固定因素为调查时间(即季节)和样地(即各胶园),显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。当测验存在显著差异

时,水平间的多重比较采用最小显著极差法(Duncan's new multiple range test)。所有图示均用SigmaPlot 12.0 作图。

2 结果与分析

2.1 各月降雨量

图1为研究样地所在区域2013年4月至2014年3月的月降雨量,全年降雨量波动较大。雨季降雨事件较为频繁,降雨量较大;旱季降雨量少,但在本处于旱季的12月,却出现反常的较大降雨。由西双版纳热带森林生态系统生态站的资料表明,自2013年12月13日起,中国科学院西双版纳热带植物园所在地区出现了连续性阴雨天气,其中有两日日降水量达到100 mm,同时温度骤降(图2),出现连续的降温,到12月19日出现的最低气温低至5.9℃,成为自上世纪80年代以来本地区位居第4的低温,其它3次分别为1982年12月28日(5.6℃),1993年12月28日(4.4℃)和1999年12月27日(2℃)。在热带地区,气温若连续低于5℃,会发生热带植物的冷害(冯耀宗,2007)。因此,此次降雨和降温事件也必然对橡胶树的生理生态活动产生一系列的影响。

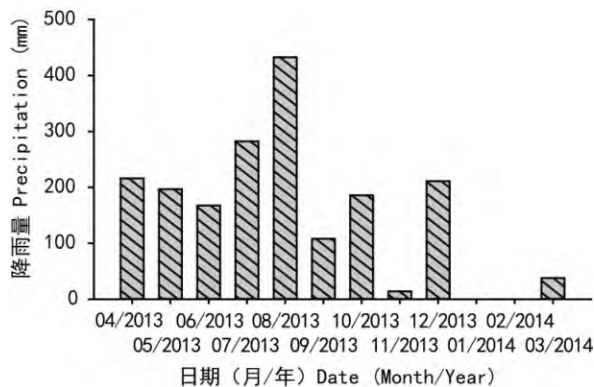


图1 调查样地月降雨量

Fig. 1 Monthly precipitation in the study area

2.2 不同胶园土壤含水量的季节变化

不同胶园土壤含水量和水分变异程度均存在差异(图3)。五种胶园土壤平均含水量大小为胶—千复合系统 > 胶—茶复合系统 > 胶—咖复合系统 > 单层橡胶林 ≈ 胶—可复合系统,其中除了单层橡胶林与胶—可复合系统土壤含水量之间差异不显著

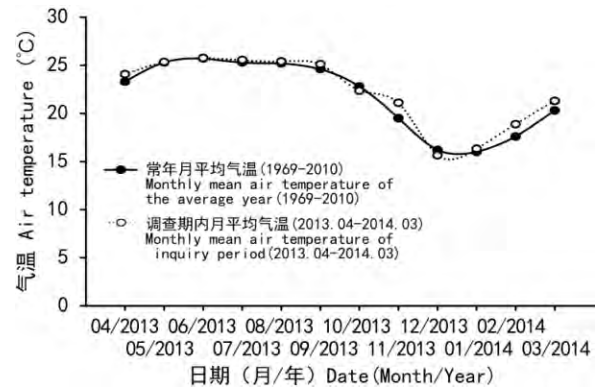


图2 调查样地常年月平均气温及调查期内月平均气温

Fig. 2 Monthly mean air temperature of the average year and inquiry period in the study area

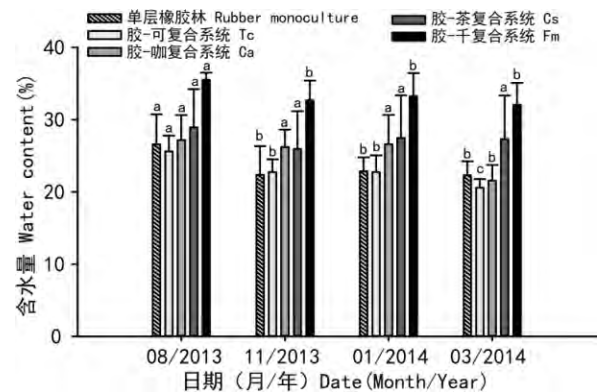


图3 不同胶园土壤含水量的季节变化 Tc. 橡胶—可可胶农(林)复合系统。Ca. 橡胶—咖啡胶农(林)复合系统。Cs. 橡胶—茶胶农(林)复合系统。Fm. 橡胶—大叶千斤拔胶农(林)复合系统。小写字母表示各胶园土壤含水量季节变化的差异显著性($P < 0.05$)。下同。

Fig. 3 Seasonal variation of soil water contents in different rubber plantations Tc. *Hevea brasiliensis*-*Theobroma cacao* agroforestry ecosystem. Ca. *Hevea brasiliensis*-*Coffea arabica* agroforestry ecosystem. Cs. *Hevea brasiliensis*-*Camellia sinensis* agroforestry ecosystem. Fm. *Hevea brasiliensis*-*Flemingia macrophylla* agroforestry ecosystem. Different small letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different seasons of each rubber plantation. The same below.

外,其余样地之间土壤含水量的差异均达到极显著水平($P < 0.01$)。

在调查的4个时期中,5个胶园的平均土壤含水量在2013年8月为最大,2014年3月为最小,2013年11月与2014年1月的土壤含水量差异不显著,平均值位于其它两月份之间。其中,胶—茶复合系统四个月的土壤含水量季节差异不显著($F = 0.556$, $P = 0.659$);胶—千复合系统土壤含水量最

高,季节变化小($F = 3.075$, $P = 0.091$);胶—可复合系统土壤含水量最低,季节变化显著($F = 23.951$, $P < 0.01$)。

2.3 不同胶园内的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 季节变化

调查期内 5 个胶园共五种植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值如图 4 所示,测定结果显示橡胶树叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值均值的 95% 置信区间为 $-31.226 \sim -30.524\text{‰}$,而叶茶的为 $-32.036 \sim -31.354\text{‰}$,咖啡的为 $-31.661 \sim -30.679\text{‰}$,大叶千斤拔的为 $-33.944 \sim -32.551\text{‰}$,可可的为 $-32.603 \sim -31.142\text{‰}$ 。根据 Pate(1999) 所述, C3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-20 \sim -34\text{‰}$,因此可断定这 5 种植物都属于 C3 植物。

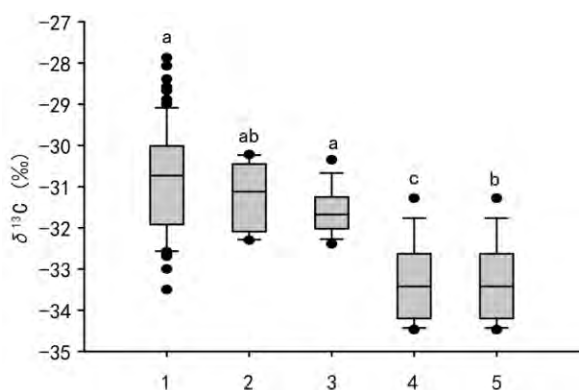


图 4 5 种植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 1. 橡胶树; 2. 云南大叶茶; 3. 咖啡; 4. 大叶千斤拔; 5. 可可。

Fig. 4 Leaf $\delta^{13}\text{C}$ of these five studied plant species 1. *Hevea brasiliensis*; 2. *Camellia sinensis*; 3. *Coffea arabica*; 4. *Flemingia macrophylla*; 5. *Theobroma cacao*.

对各胶园总的植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行两因素方差分析,结果显示胶园间植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异极其显著($F = 8.202$, $P < 0.01$),多重比较的结果显示胶—茶、胶—干、胶—可复合系统和单层橡胶林之间植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著(图 5),而胶—咖复合系统内植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值极显著高于其它复合系统;同时取样时间之间植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异极其显著($F = 7.002$, $P < 0.01$),多重比较的结果为 2014 年 3 月植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于其余调查月份,其余 3 个调查月之间植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著;此外,取样时间与胶园间交互作用不显著($F = 0.844$, $P = 0.065$)。

对于间作植物来说(图 6),在四种胶农(林)复合系统中,除了胶—可复合系统中橡胶树和可可叶

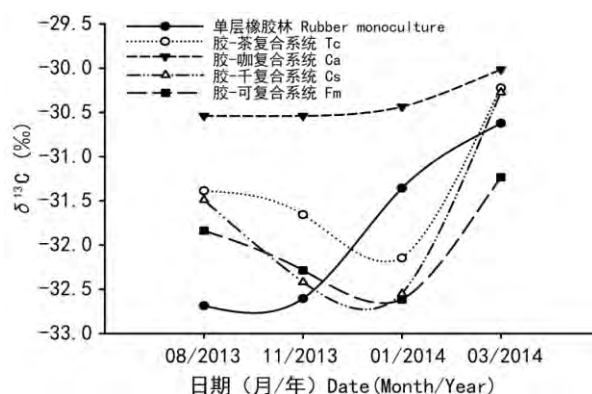


图 5 各个胶园总体植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化

Fig. 5 Leaf $\delta^{13}\text{C}$ seasonal variation of all plants in different rubber plantations

片 $\delta^{13}\text{C}$ 值(图 6: D)差异不显著($F = 1.416$, $P = 0.251$),其余胶农(林)复合系统内橡胶树叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值都显著高于其间作植物。同时,除胶—咖复合系统中橡胶树叶片与咖啡叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势正好相反(图 6: B),使得该系统总体 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化较小(图 5)以外,其余胶农(林)复合系统中橡胶树与及间作植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势大致相同。

仅橡胶树而言(图 7),对其叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行两因素方差分析,结果显示各胶园间差异达到极显著水平($F = 30.469$, $P < 0.01$),多重比较结果为胶—咖复合系统 > 胶—干复合系统 > 胶—茶复合系统 > 单层橡胶林 $\approx$ 胶—可复合系统;而取样时间之间橡胶树叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异也极其显著($F = 29.68$, $P < 0.01$),多重比较结果显示 2014 年 3 月橡胶树叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于其它调查月份,其它月份差异不显著;取样时间与胶园间的交互作用显著($F = 2.019$, $P < 0.05$)。而各胶园橡胶树叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化从总体上看,在 2013 年 8 月,11 月以及 2014 年 1 月,这三个月份差异不显著;而到 2014 年 3 月的时候,橡胶树 $\delta^{13}\text{C}$ 值急剧升高,为目前所有调查月份中 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高的一个月,与其它月份的差异达到极显著水平($P < 0.01$)。单独来看,单层橡胶林橡胶树叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 2014 年 1 月即有显著变化;胶—咖复合系统橡胶树叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值季节差异较小,变化不大;其余胶园橡胶树叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势与总体的变化趋势大致相同。

2.4 不同胶园内植物叶片水势的季节变化

对于 Ψ_{pd} 和 Ψ_{md} 从群落尺度来看(图 8: A),不

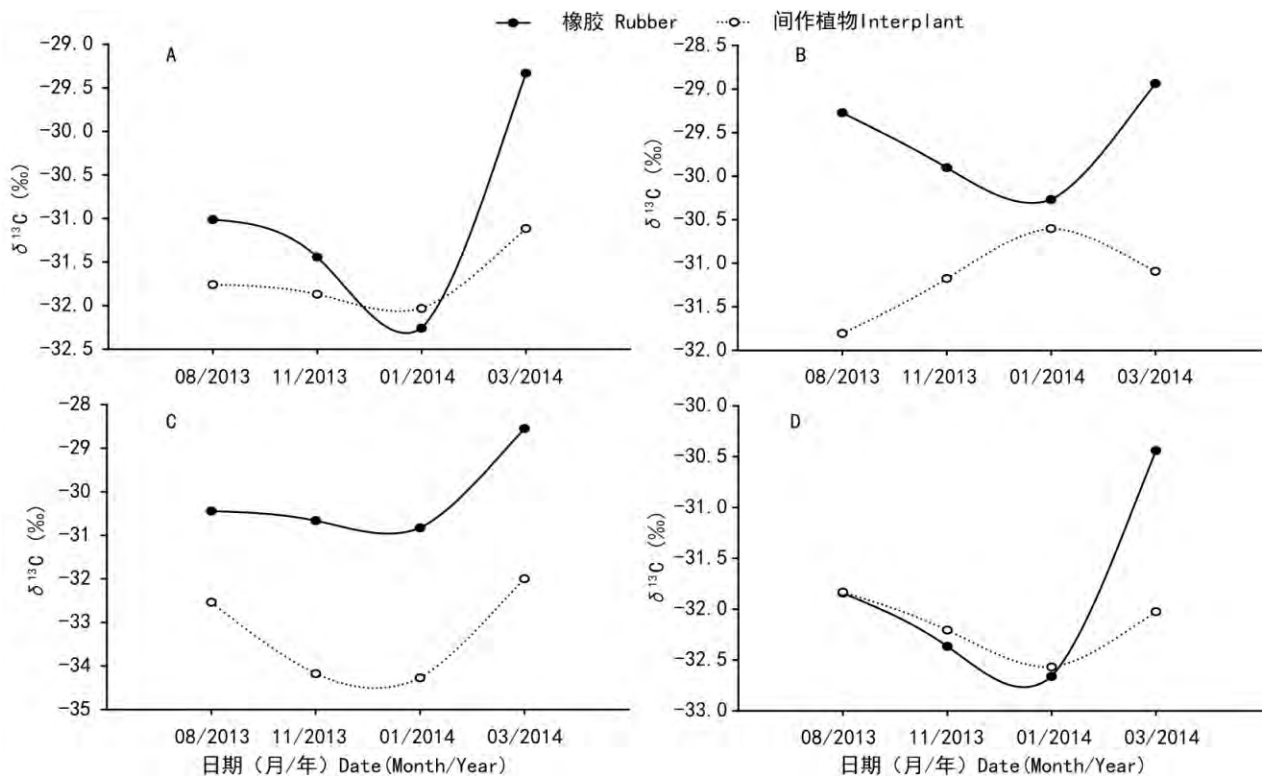


图 6 4 种胶农(林)复合系统中橡胶树与其间作植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 A. 橡胶—叶茶胶农(林)复合系统; B. 橡胶—咖啡胶农(林)复合系统; C. 橡胶—大叶千斤拔胶农(林)复合系统; D. 橡胶—可可胶农(林)复合系统。

Fig. 6 Leaf $\delta^{13}\text{C}$ of rubber tree and its interplant in each rubber plantation in four agroforestry ecosystems A. *Hevea brasiliensis*-*Camellia sinensis* agroforestry ecosystem; B. *Hevea brasiliensis*-*Coffea arabica* agroforestry ecosystem; C. *Hevea brasiliensis*-*Flemingia macrophylla* agroforestry ecosystem; D. *Hevea brasiliensis*-*Theobroma cacao* agroforestry ecosystem.

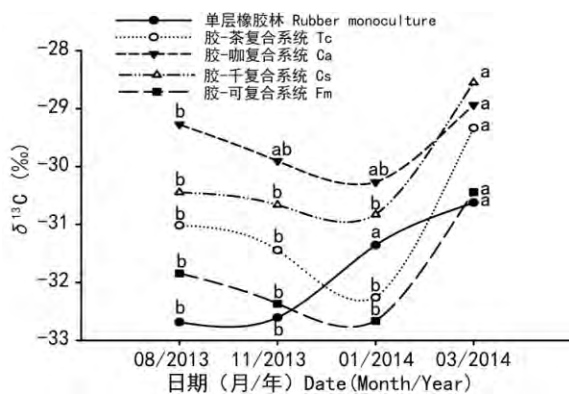


图 7 5 种胶园橡胶叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化
Fig. 7 Leaf $\delta^{13}\text{C}$ seasonal variation of rubber in five rubber plantations

论胶园之间或是取样时间之间,差异均达到极显著水平($P < 0.01$),但胶园和取样时间之间 Ψ_{pd} 的交互作用不显著($F = 1.75$, $P = 0.069$), Ψ_{md} 的交互作

用显著($F = 2.362$, $P = 0.011$)。

如图 8 所示, 5 个胶园内的植物枝条凌晨水势 Ψ_{pd} 差异不大(除胶—茶复合系统的 Ψ_{pd} 最高,其它胶园的 Ψ_{pd} 差异不显著),季节变化较小(除 2013 年 8 月测定的 Ψ_{pd} 最高,其它月份间 Ψ_{pd} 差异不显著);不同胶园之间正午水势 Ψ_{md} 的差异显著, Ψ_{md} 最高的为胶—千复合系统,同时,除胶—茶复合系统 Ψ_{md} 季节变化不大($F = 2.656$, $P = 0.076$),其余复合系统的 Ψ_{md} 变化较大,总体变化与土壤含水量相似,呈极显著相关($r = 0.347$, $P < 0.01$)。

而橡胶树的水势也呈现与复合系统类似的变化(图 8: B),各胶园橡胶树的 Ψ_{pd} 差异较小,季节变化小;进入旱季之后(即除了 2013 年 8 月外),各胶园橡胶树的 Ψ_{md} 差异加大,季节变化不一致,胶—可复合系统与单层橡胶林内橡胶树 Ψ_{md} 的季节变化极其相似,且显著低于其它复合系统橡胶树的 Ψ_{md} ,胶—茶与胶—咖复合系统 Ψ_{md} 变化趋势相似。

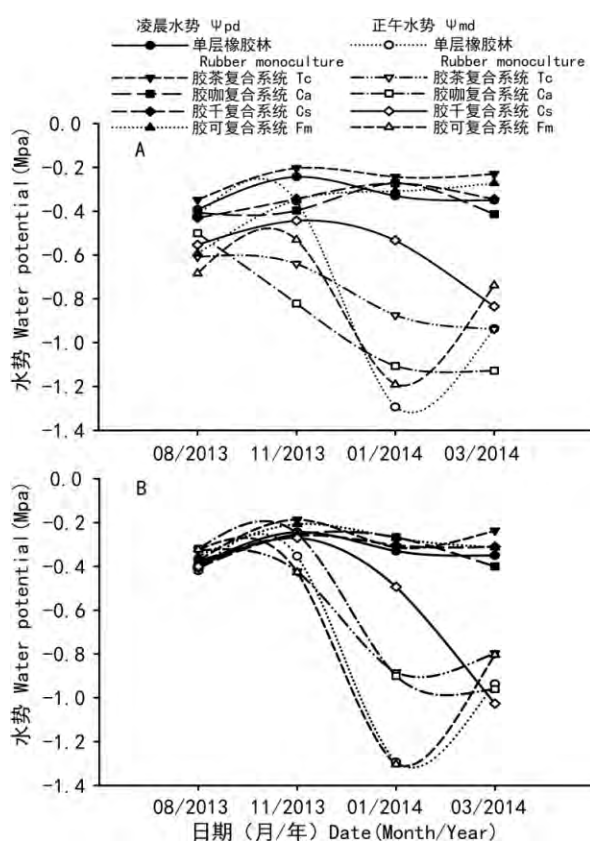


图 8 各个胶园内全部植物和橡胶树叶片枝条水势

A. 全部植物; B. 橡胶树。

Fig. 8 Shoot predawn and midday water potential of all plant and rubber tree in each rubber plantation A. All plants; B. Rubber.

3 讨论

3.1 土壤含水量与降雨量的关系

雨水是土壤水的主要补给来源, 尽管各调查月的降雨量差别很大, 但是土壤含水量的变化相对较小, 尤其是 2013 年 11 月和 2014 年 1 月所测量的土壤含水量差异不显著。分析原因主要是 2013 年 12 月份反常的较大降雨量使得本处于旱季阶段的土壤获得了较充足的水量补给; 另外 12 月份橡胶树开始出现落叶现象, 在 2 月中旬的时候基本脱光, 这一直被看作是橡胶为减少蒸腾失水的策略, 且落叶覆盖层还能起到减少蒸发和保温的作用; 此外, 在西双版纳雾凉季(11 月至次年 2 月), 几乎每日午前都有大雾弥漫, 有时雾水如细雨一般, 刘文杰等(2006)发现雾水是热带季雨林浅层土壤水在干季的主要水源, 同时雾还可以释放凝结潜热而减弱降温强度, 缩

短日照时数而消减蒸发散, 是导致西双版纳地区热带雨林蒸发散和土壤蒸发率较低的重要因子, 这使得土壤不会因蒸发而失水太多, 对缓解植物干旱方面具有重要作用。

另外, 比较各胶园土壤平均含水量大小可以发现有多层植被覆盖的胶农(林)复合系统(除胶—可复合系统)保水能力要强于只有单层植被覆盖的纯橡胶林(即单层橡胶林), 这可能是因为多层植被覆盖可以很大程度上减弱表层土壤水的蒸发, 从而增强土壤的保水能力。但土壤含水量是受降水、林冠截留、植被耗水等多因素综合影响, 所以胶—可复合系统与单层橡胶林之间土壤含水量没有差异是因为间作密度还是植物本身原因, 以及各胶农(林)复合系统之间土壤含水量的差异还有待进一步研究。

3.2 叶片枝条水势的季节变化

不论整个胶园系统或各个胶园内的橡胶树, Ψ_{pd} 的季节变化都较小, 一方面得益于土壤水在各季节的稳定性供给, 另一方面还与旱季的辐射雾有关(刘文杰等, 2006)。但在旱季, 当正午时分大雾散去, 光照增强, 植物叶片气孔迅速打开, 蒸腾失水导致 Ψ_{md} 极显著低于 Ψ_{pd} ; 而在雨季, 由于雨量充沛, 且降雨事件频繁, 阴天日照数缩短, 这可能导致橡胶树的 Ψ_{md} 与 Ψ_{pd} 差异不大。

各个复合系统水势的差异有可能受间作植物的影响, 由于植物枝条的 Ψ_{md} 与土壤含水量极显著相关, 它对水分可利用性的变化更为敏感, 因此仅讨论植物枝条的 Ψ_{md} 。从整个复合系统来看, 旱季单层橡胶林的 Ψ_{md} 明显低于其它复合系统的; 仅观察橡胶树, 结果是单层橡胶林的 Ψ_{md} 明显低于除胶—可复合系统以外的其它胶农(林)复合系统的, 它与胶—可复合系统内橡胶的 Ψ_{md} 无显著差异, 且季节变化极其相似, 这说明除胶—可复合系统外, 其它复合系统可以有效缓解橡胶树在干季所受到的干旱胁迫。

3.3 各胶园植物水分利用效率(WUE)的季节变化

Farquhar & Richards(1984)认为, C3 植物组织的 $\delta^{13}C$ 与其水分利用效率(WUE)具有很强的相关性, 可以作为 C3 植物水分利用效率(WUE)的间接测定指标, 研究得出水分利用效率(WUE)与 $\delta^{13}C$ 的关系可由下式表示:

$$WUE = C_a \left[1 - \left(\frac{\delta^{13}C_a - \delta^{13}C_p}{a(b - a)} \right) \right] / 1.6\Delta W$$

式中 $\delta^{13}\text{C}_p$ 和 $\delta^{13}\text{C}_a$ 分别为植物叶片组织及大气中 CO_2 的碳同位素比率; a 是气孔扩散过程中发生的分馏, 其分馏值约为 4.4‰; b 为羧化反应过程中发生的同位素分馏, 其值约为 27‰; 而 C_a 分别为细胞间和大气的 CO_2 浓度; ΔW 代表叶片内外水气压差; 而数值 1.6 表示的是水蒸汽和 CO_2 在空气中的扩散比率 (Farquhar & Richards, 1984)。

由于植物组织内的碳是长期积累的结果, 因此可以用植物组织 $\delta^{13}\text{C}$ 来指示植物的长期水分利用效率, 这一观点也得到了大量研究的支持 (Pate, 1999; Dawson et al, 2002; Tambussi, 2007), 所以直接比较不同胶园植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 即可知道胶园间 WUE 的大小差异及季节变化。

光照和水分是植物 WUE 的主要影响因素 (Farquhar et al, 1982), 其中水分条件更被认为是植物 WUE 的决定因素 (渠春梅等, 2001)。 WUE 依赖于水分可利用性, WUE 与水源的可利用性呈负相关 (Ehleringer & Dawson, 1992)。本调查结果显示植物 WUE 与土壤含水量之间相关性较小, 且不显著, 可能是受到 12 月低温事件的干扰, 因为降温可提高植物的水分利用效率 (Morecroft & Woodward, 1990), 同时植物不同季节水源的变化以及对水分的竞争也不同程度地干扰了结果, 但这 5 个胶园的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤含水量的变化是相对应的。各胶园的土壤含水量由大到小为胶—千复合系统 > 胶—茶复合系统 > 胶—咖复合系统 > 单层橡胶林 $\approx$ 胶—可复合系统; 橡胶树叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值由大到小为胶—咖复合系统 > 胶—千复合系统 > 胶—茶复合系统 > 单层橡胶林 $\approx$ 胶—可复合系统。前 3 次调查 (2013 年 8 月、11 月; 2014 年 1 月), 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤含水量的变化都不大, 而在 2014 年 3 月土壤含水量明显减少, 植物 Ψ_{md} 降低, 显示植物受到干旱胁迫, 此时植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显地升高。植物各种水利特征之间存在着相互依赖性, 植物利用水分的变化是多种互相依赖的水利特征的结果 (Mediavilla & Escudero, 2004), 因此, 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤含水量的关系还需进一步调查。

至于橡胶树与其间作树种的 WUE 关系, 可发现除胶—可复合系统外, 各复合系统内橡胶树的 WUE 都显著高于其间作植物, 也显著高于单层橡胶林内的橡胶树, 说明橡胶树分别与 4 种植物间作后, 其水分利用策略转变为保守型, 它与间作植物之间很可能存在着对水源的分配和竞争; 胶—茶复合系统内

橡胶树的 WUE 在 2014 年 1 月低于茶树的 WUE , 可能是受 2013 年 12 月寒害的影响; 胶—咖复合系统内橡胶树 WUE 与咖啡 WUE 效率的变化趋势正好相反, 很可能是两者之间存在竞争关系, 因为 WUE 还依赖于植物对水分的潜在竞争 (Ehleringer et al, 1992), 冯耀宗 (2007) 就曾发现橡胶—咖啡人工群落中, 咖啡的吸收根与橡胶树吸收根的分布基本相似, 由于根系间的竞争, 抑制了咖啡的生长, 而本次调查结果也证实了这一发现。

此外, 对于各胶园之间的 WUE , 本研究发现除了胶—可复合系统以外, 其它胶农 (林) 复合系统 WUE 都显著高于单层橡胶林, 一般来说 WUE 高, 植物生产力也较大 (Tsialtas et al, 2001; 陈世苹等, 2004), 耐旱性也越强。同时, 除了单层橡胶林以外, 各胶园 WUE 季节变化都较为相似。单层橡胶林 WUE 在 2014 年 1 月即表现出上升的趋势, 可能是受到 2013 年 12 月出现的连续低温降雨事件的影响, 这说明胶农 (林) 复合系统对于突发性天气灾害具有一定的抵御能力。仅橡胶树而言, 即使在单层橡胶林中 WUE 有所上升, 但在所调查的最早的月份 (2014 年 3 月) 其 WUE 仍然是所有胶园中最低的。这都说明了胶农 (林) 复合系统的模式对改善橡胶树 WUE 的成效是显著的。

以上研究表明, 单层橡胶林在旱季来临时就受到水分胁迫, 其 WUE 仍然很低, 使得其在水分限制条件下生产与生长都受到抑制。胶—可复合系统与单层橡胶林在各方面的表现都极为相似, 这说明胶—可复合系统对缓解橡胶树在旱季受到的干旱胁迫效果不显著, 唯有在 2013 年 12 月受到寒害后 WUE 的变化没有单层橡胶林显著, 这可以说明复合系统能在一定程度上抵御寒害。其它复合系统之间各有不同表现, 胶—千复合系统内土壤含水量要高于其它所有复合系统, 说明其保水能力最强; 胶—茶复合系统虽然土壤含水量低于胶—千复合系统, 但最为稳定, 季节变化最小, 能为橡胶树提供稳定而可靠的水源; 胶—咖复合系统 WUE 最高, 且最稳定, 即使受到寒害也没有引起较大变化, 因此该系统能保持较高且较稳定的生长和生产力, 也说明适当的竞争有利于加强植物对水分的利用。综上所述, 除胶—可复合系统以外, 其它 3 种胶农 (林) 复合系统都显著地缓解了橡胶树在旱季所遭受到的水分胁迫, 同时也能有效抵御突发性天气灾害。但是对于间作植物的具体功能, 以及胶—可复合系统的失败

是由于间作植物的原因或是空间配置结构的原因还需要进一步的研究来获得可靠的结果。

致谢 感谢刘梦楠、陈志冈、邓云超先生在实验工作中给予的帮助! 感谢西双版纳热带森林生态系统研究站提供的数据支持。

参考文献:

- CHEN P, CAO FL, WANG GB, 2010. The progress of study on agro-forestry [J]. J Nanjing For Univ: Nat Sci Ed, 34(3): 151–156. [程鹏, 曹福亮, 汪贵斌, 2010. 农林复合经营的研究进展 [J]. 南京林业大学学报·自然科学版, 34(3): 151–156.]
- CHEN SP, BAI YF, HAN XG, et al, 2004. Variations in foliar-carbon isotope composition and adaptive strategies of *Carex korshinskyi* along a soil moisture gradient [J]. Chin J Plant Ecol, 28(4): 515–522. [陈世苹, 白永飞, 韩兴国, 等, 2004. 沿土壤水分梯度黄囊苔草碳同位素组成及其适应策略的变化 [J]. 植物生态学报, 28(4): 515–522.]
- DAWSON TE, MAMBELLI S, PLAMBOECK AH, 2002. Stable isotopes in plant ecology [J]. Ann Rev Ecol Syst, 33(1): 507–559.
- DEA GB, ASSIRI AA, GABLA OR, et al, 2002. Influence of soil preparation method on root and vegetative growth of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) in the southwest Côte d'Ivoire [J]. Soil Till Res, 59(1): 3–11.
- EHRLINGER JR, DAWSON TE, 1992. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition [J]. Plant Cell Environ, 15(9): 1 073–1 082.
- FARQUHAR GD, O'LEARY MH, BERRY JA, et al, 1982. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves [J]. Funct Plant Biol, 9: 121–137.
- Farquhar GD, Richards RA. 1984. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes [J]. Funct Plant Biol, 11(6): 539–552.
- FENG YZ, 2007. Man-Made Community [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. [冯耀宗, 2007. 人工群落 [M]. 昆明: 云南科技出版社.]
- FRY B, 2006. Stable isotope ecology [M]. New York: Springer.
- LI H, AIDE TM, MA Y, et al, 2007. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China [J]. Biodivers Conserv, 16: 1 731–1 745.
- LI WR, ZHAO GX, ZHANG HB, 2009. Building of a new complex ecosystem for rubber plantation by application of biodiversity theory [J]. Chin J Trop Agric, 29(57): 57–61. [李维锐, 赵国祥, 张洪波, 2009. 应用生物多样性理论构建新型校园复合生态系统的思考 [J]. 热带农业科学, 29(57): 57–61.]
- LIU W, LUO Q, LI J, et al, 2013. The effects of conversion of tropical rainforest to rubber plantation on splash erosion in Xishuangbanna, SW China [J]. Hydrol Res. doi: 10. 2166/nh. 2013. 109.
- LIU WJ, LI PJ, LI HM, 2006. Fog interception and its relation to soil water in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China [J]. Acta Ecol Sin, 26: 9–15. [刘文杰, 李鹏菊, 李红梅, 2006. 西双版纳热带季节雨林林冠截留雾水和土壤水的关系 [J]. 生态学报, 26: 9–15.]
- MEDIAVILLA S, ESCUDERO A, 2004. Stomatal responses to drought of mature trees and seedlings of two co-occurring Mediterranean oaks [J]. For Ecol Manag, 187(2): 281–294.
- MORECROFT MD, WOODWARD FI, 1990. Experimental investigations on the environmental determination of $\delta^{13}\text{C}$ at different altitudes [J]. J Exp Bot, 41: 1 303–1 308.
- PANG JP, CHEN MY, TANG JW, et al, 2009. Plant growth, and the dynamics of soil water and nutrient in *Hevea brasiliensis*-*Flemingia macrophylla* agroforestry ecosystem [J]. J Mount Sci, 27: 433–441. [庞家平, 陈明勇, 唐建维, 等, 2009. 橡胶-大叶千斤拔复合生态系统中的植物生长与土壤水分养分动态 [J]. 山地学报, 27: 433–441.]
- PATE J, DAWSON TE, 1999. Assessing the performance of woody plants in uptake and utilisation of carbon, water and nutrients: Implications for designing agricultural mimic systems [J]. Agrofor Syst, 45: 245–275.
- PINTO LFG, BERNARDES MS, VAN M, et al, 2005. Simulation of agroforestry systems with sugarcane in Piracicaba, Brazil [J]. Agric Syst, 86(3): 275–292.
- QU CM, HAN XG, SU BO, et al, 2001. The characteristic of foliar $\delta^{13}\text{C}$ value of plant and plant water use efficiency indicated by $\delta^{13}\text{C}$ value in two fragmented rainforests in Xishuangbanna, Yunnan [J]. Acta Bot Sin, 43: 186–192. [渠春梅, 韩兴国, 苏波, 等, 2001. 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]. 生态学报, 43: 186–192.]
- RODRIGO VHL, SILVA TUK, MUNASINGHE ES, et al, 2004. Improving the spatial arrangement of planting rubber (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) for long-term intercropping [J]. Field Crops Res, 89: 327–335.
- RODRIGO VHL, STIRLING CM, TEKLEHAIMANOT Z, et al, 1997. The effect of planting density on growth and development of component crops in rubber/banana intercropping systems [J]. Field Crops Res, 52(1): 95–108.
- SCHROTH G, MORAES VHF, DA MOTA MSS, 2004. Increasing the profitability of traditional, planted rubber agroforests at the Tapajós river, Brazilian Amazon [J]. Agric Ecosyst Environ, 102(3): 319–339.
- SNOECK D, LACOTE R, KÉLI J, 2013. Association of hevea with other tree crops can be more profitable than hevea monocrop during first 12 years [J]. Ind Crops Prod, 43: 578–586.
- TAMBUSSI EA, BORT J, ARAUS JL, 2007. Water use efficiency in C3 cereals under Mediterranean conditions: a review of physiological aspects [J]. Ann Appl Biol, 150: 307–321.
- TSIALTAS JT, HANDLEY LL, KASSIOUMI MT, et al, 2001. Interspecific variation in potential water-use efficiency and its relation to plant species abundance in a water-limited grassland [J]. Funct Ecol, 15(5): 605–614.