

西双版纳山地橡胶林凋落物的生态水文效应*

卢洪健^{1,2} 刘文杰^{1**} 罗亲普^{1,2}

(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, 云南勐腊 666303; ²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 森林凋落物具有阻滞径流、拦截泥沙和均衡土壤水热状况等功效。以西双版纳地区 20 年生橡胶林为对象, 采用径流微小区法和剔除-对照凋落物等实验, 测定了其凋落物的生态水文效应。结果表明: 橡胶林坡地剔除凋落物径流微小区(2009 年 10 月—2010 年 9 月) 径流量为 625.7 ± 18.5 mm, 显著高于对照的 185.1 ± 72.7 mm; 剔除凋落物径流泥沙浓度与最大 1 h 降雨强度呈显著正相关。剔除凋落物使橡胶林坡地(6、7 月除外) 和台地(8 月除外) 表层土壤(0~10 cm) 湿度均显著降低; 剔除凋落物表土平均温度在雾凉季(11 月—翌年 2 月) 显著低于对照, 而在干热季(3—4 月) 显著高于对照, 且剔除凋落物表土温度整年都比对照具有更大日变化幅度。可见橡胶林凋落物具有较好的生态水文功效, 然而, 受频繁人为割胶活动等的的影响, 台地凋落物的分解速率在雨季中、后期加快, 不利于其生态水文效应的发挥, 故在营林活动和生态恢复中应加强对凋落物的管理与保护。

关键词 凋落物层; 阻滞径流; 拦截泥沙; 土壤温湿度; 人工橡胶林

中图分类号 S715; S718.54 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2011)10-2129-08

Eco-hydrological effects of litter layer in a mountainous rubber plantation in Xishuangbanna, Southwest China. LU Hong-jian^{1,2}, LIU Wen-jie^{1**}, LUO Qin-pu^{1,2} (¹Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(10): 2129–2136.

Abstract: Forest litter has considerable eco-hydrological effects in retarding surface runoff, trapping sediment, and equilibrating soil water and heat status. In this paper, a micro-plot field experiment was conducted in a 20-year-old mountainous rubber plantation in Xishuangbanna to study the litter's eco-hydrological effects in retarding surface runoff and reducing soil loss. In the plots with litter removal, the slope surface runoff in the period of October 2009–September 2010 was 625.7 ± 18.5 mm, being significantly larger than that (185.1 ± 72.7 mm) in the plots with litter remained. Under the treatment of litter removal, the sediment concentration of runoff was significantly positively correlated with the maximum intensity of an episode rainfall (within 1 h) during a day, and the gravimetric water content in surface soil (0–10 cm) at slope stands (except June and July) and terrace stands (except August) decreased significantly. Litter removal made the mean temperature at soil surface and at 10 cm soil depth increased by 0.4 °C and 0.3 °C in cool-foggy season (from November to next February) and decreased by 0.7 °C and 0.4 °C in hot-dry season (March and April), respectively. Moreover, the diurnal temperature fluctuation in the surface soil without litter covering was more drastic throughout the year. These results suggested the litter layer in mountainous rubber plantation had great effects in buffering overland flow, trapping sediment, and moderating extreme surface soil water and heat status. However, under the impacts of frequent rubber latex collection, the litter decomposition in the rubber stands at terrace was accelerated in middle and late rainy season, which was obviously not beneficial to the bringing into play of the litter's eco-hydrological effects. Therefore, in the management and

* 中国科学院“西部之光”计划项目和国家自然科学基金项目(31170447 和 30770368) 资助。

** 通讯作者 E-mail: lwj@xtbg.org.cn

收稿日期: 2011-03-30 接受日期: 2011-06-28

ecological restoration of mountainous rubber plantation ecosystems, it would be necessary to conserve the litter layer with reasonable manners.

Key words: litter layer; surface runoff retardation; sediment trapping; soil moisture and temperature; rubber plantation.

凋落物作为森林生态系统中的第二个功能层,通常具有阻滞径流、拦截泥沙和抑制蒸发等生态水文功效,对森林土壤水热平衡和土-气界面过程起着重要的调节作用(王佑民,2000;朱金兆等,2002;Ogée *et al.*,2002;Sayer,2006;Zhang *et al.*,2008;王云琦和王玉杰,2010)。疏松多孔且呈堆叠状态的凋落物增加了地表糙率,是阻滞径流和拦截泥沙效应的物理基础。赵鸿雁等(2003)采用模拟实验得出凋落物滞缓径流时间与凋落物厚度、坡度和径流深度有关的结论。何常清等(2006)对华北落叶松林的研究表明,凋落物层对径流流速的阻延值与单宽流量、凋落物覆盖量都呈极显著的相关关系,指出凋落物覆盖量从 $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $25.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,地表径流流速减小的幅度为 $57.50\% \sim 72.27\%$ 。王金叶等(2008)研究得出祁连山青海云杉林林地剔除凋落物后的径流量比原林分增加了1.8倍。Zhang等(2008)建立了基于GIS的土壤流失预报模型FUSLE,同时根据野外径流微型小区观测数据分析得出,冷杉林剔除凋落物和草被的情况下土壤流失量是有凋落物等的71倍。此外,袁梦仙等(2004)、张振明等(2005)、郭剑芬等(2006)、Morales等(2000)、Zhou等(2002)、Hartanto等(2003)、以及Hou等(2010)对各地不同类型的森林进行了相关研究,均表明凋落物阻滞径流和拦截泥沙的功能显著,在森林水土保持过程中发挥着不可或缺的作用。

早期研究(Ginter *et al.*,1979;Ponge *et al.*,1993)表明,有凋落物覆盖情况下,土壤含水量的变化更趋渐缓;剔除凋落物通常会导致土壤温度产生更大的日变化幅度,同时会使暖季温度增大;在温带地区,凋落物在冬季能延迟土壤结冰时间并缩短土壤冻结时段。吴钦孝等(2005)对油松林和山杨林的研究表明,凋落物抑制土壤水分蒸发的效应显著,土壤水分相同时,土壤覆盖5cm油松和山杨凋落物的蒸发量比覆盖2cm分别减少了 $15.7\% \sim 32.0\%$ 和 $15.3\% \sim 34.9\%$;凋落物覆盖厚度相同时,土壤含水量的增加导致了蒸发量的显著增加。张卫强等(2007)研究得出刺槐林凋落物抑制蒸发的效应好

于苔藓。Marthews等(2008)利用SWEAT模型对不同林窗下的土壤温度进行了模拟研究,指出在凋落物完好的林地,土壤深部之间的热传导十分稳定,且5~50mm各土壤剖面的温度变化甚微。此外,Park等(1998)建立了评价凋落物抑制蒸发效应的数字模型(LITEM),指出随着凋落物含水量和厚度的增加,其抑制蒸发的效应增强;而Ogée和Brunet(2002)通过添加2个动力学方程,在森林SVAT模型的基础上建立了凋落物的水热模型,该模型能较好地模拟凋落物、土壤的温湿度以及地被物上方的湍流通量。

三叶橡胶树(*Hevea brasiliensis*)原产亚马逊河流域的热带雨林,其生长环境要求全年具有充足的热量(气温 $24^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$)和水分(降水1600~2000mm),大致分布于赤道南、北纬 10° 范围内,分布区的海拔一般不超过600m。但是,由于受经济利益的驱使,橡胶树已被引种和扩种到东南亚、南美、非洲的很多高纬度和高海拔地区,在这些边缘的次适宜种植区,橡胶树的生长状况、产胶期和产量都受到了极大的影响(李国华等,2009)。

西双版纳地处水热条件相对不足的热带北缘,近几十年最显著的土地利用/覆被变化(LUCC)就是大面积热带雨林向单层橡胶林的转化,其中受破坏最严重的是海拔800m以下的热带雨林,自20世纪70年代到2007年共丧失了14万 hm^2 之多(Li *et al.*,2008)。大面积的热带雨林被结构单一的橡胶林(林冠结构简单,管理活动频繁:定期喷洒除草剂和施肥、割胶和踩踏等)所取代,导致水土流失等生态环境问题突显。然而,除杨曾奖等(1997)、任泳红等(1999)和周卫卫等(2009)对橡胶林凋落物的凋落、分解特征和持水性能做过初步研究外,有关橡胶林凋落物生态水文效应的研究还少见报道。本文以西双版纳地区20年林龄山地橡胶林为研究对象,采用“径流微型小区法”和剔除-对照凋落物等方法,对凋落物阻滞径流等生态水文效应进行了初步研究,以期评价橡胶林凋落物的生态水文功效和生态系统恢复提供相关的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西双版纳 (21°09'N—22°33'N, 99°58'E—101°50'E) 地处北回归线以南的热带北缘, 受西南季风的影响, 一年有 3 个明显的季节划分: 雾凉季 (11—次年 2 月)、干热季 (3—4 月) 和雨季 (5—10 月)。年平均降雨量 1400 mm 左右, 雨季降雨量占全年降雨量的 80% 以上, 干季降雨量不足 13%; 年均气温 21.4 °C, 干燥度 1.01, 相对湿度 85%。全州面积 19223 km², 其中山地 (坡度 > 8°) 面积占 95%, 山间盆地 (坡度 ≤ 8°) 面积占 5%, 以热带森林茂密著称; 地形多为丘陵宽谷型小盆地、多溪流; 地带性土壤为砖红壤和赤红壤。

本研究选取位于云南省西双版纳自治州中国科学院西双版纳热带植物园 (21°56'N, 101°15'E) 内的 20 年生橡胶人工林, 定植于环坡 1.5 m 宽稍上倾台地上, 平均海拔 680 m, 平均株距 1.5 m, 株高 14.5 m, 胸径 (1.3 m 处) 16.7 cm, 密度约 425 株 · hm⁻², 郁闭度约为 0.85。林下草本稀少 (胶农定期喷洒除草剂所致), 仅见少量橡胶幼苗等; 行间的坡地保护带的均宽为 2.0 m。在林分均匀处设置 3 块 20 m × 5 m 的标准样地 (分别记为 1、2、3), 在标准样地 1 内采用对角线法布设 5 个 0.5 m × 0.5 m 的样方, 分季节调查凋落物储量。发现 3 月份 (经历 1—2 月的集中落叶) 储量最大, 为 8.91 t · hm⁻²; 7 月底 (雨季大量分解) 降至 3.89 t · hm⁻²; 虽然雨季后期叶已基本分解, 但到 11 月份储量又明显增加, 因为经历了 8—10 月种子果壳的凋落盛期, 达到 5.56 t · hm⁻²。

1.2 研究方法

1.2.1 橡胶林坡地径流野外观测 采用自制铁皮框 (高 0.25 m) 于 2009 年 8 月在 3 块标准样地的坡地上选取合适位置 (林冠均匀的下方), 安装 6 个 1.0 m × 1.0 m 的径流微小区 (其中 1—4 号小区安装在标准样地 1 和 2 内, 5、6 号小区安装于标准样地 3), 坡度约 15°~20°, 将有出水口的一端安装在下坡方的侧面。2、4、6 号的凋落物全部剔除, 并定期对新产生的凋落物加以剔除, 而 1、3、5 号的凋落物不加处理用作对照。

采用 25 L 的塑料集水容器承接各径流微小区的径流水, 下雨后第 2 天 8:00 左右对其进行测量, 以此计算前一天产生的径流量。在雨季 (7—10 月) 根据降雨情况定期对各径流微小区产生的径流取

500 ml (取时将整个集水容器摇匀), 过滤并烘干 (105 °C, 24 h), 计算径流的泥沙浓度及含量。

前期研究采用 10 m² 径流小区 (包括 1 阶坡地和 1 阶台地) 对同一橡胶林样地有凋落物覆盖情况下的地表径流进行了连续 2 个雨季的观测, 结果表明, 有凋落物覆盖情况下, 橡胶林地雨季平均月径流量为 28.35 mm, 平均月径流系数为 0.126 ($n=12$), 雨季前期 (5、6 月) 径流系数最小, 7—9 月的降雨量和降雨强度都较大, 加上到 9 月份林地凋落物呈倒伏、贴着状态且部分已分解, 导致该时段径流系数显著增大 (平均为 0.161, $n=6$), 如图 1 所示。

1.2.2 土壤湿度的测定 在标准样地 1 和 2 内, 采用随机布设方法, 在台地和坡地上分别设置 6 块 2.0 m × 1.5 m 的小样方, 自 2010 年 1 月开始定期将其凋落物全部剔除, 并以各自相邻大小相同的小样方为对照, 维持其凋落物原状。自 2010 年 2 月开始, 定期在不同处理的每个小样方内, 用铝钻随机钻取 2 个 (总共 12 个重复) 0~10 cm 的土样, 装于称重过的铝盒中 (剔除砂石等), 立即称其湿重, 带回实验室烘干 (105 °C, 24 h) 后立即称重, 计算其质量含水量。

1.2.3 土壤温度的监测 自 2009 年 11 月开始, 在 6 个径流微小区内分别安装温度传感器 (TR-71 S, Japan), 对地表 (通道 1) 和 10 cm 深 (通道 2) 土壤温度进行监测, 每 30 min 记录 1 次, 定期下载数据并对温度传感器加以维护。

相关实验数据的统计与分析在 Excel 2003 和 SPSS 13.0 中进行, 数据图的绘制均采用 SigmaPlot 10.0 作图软件。

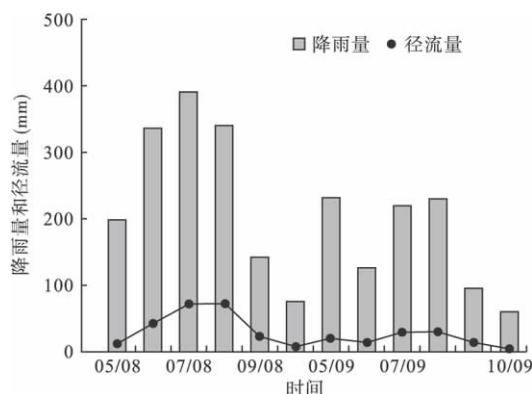


图 1 橡胶林径流小区 (10 m²) 雨季月径流量及降雨量 ($n=4$)

Fig. 1 Monthly rainfall and surface runoff of a rubber plantation at meter-scale plots (10 m²) in two consecutive rainy seasons

2 结果与分析

2.1 凋落物阻滞坡地径流的效应

剔除凋落物径流微小区(2009年10—9月)的径流量显著高于对照($P < 0.01$, $n = 3$),可见橡胶林凋落物阻滞径流的效应较好(表1);该效应在雨季表现得尤为明显,从表1可知,有凋落物覆盖情况下,雨季各月径流量均显著小于对照。油松林地连续7年剔除凋落物径流量为对照的5.2倍(吴钦孝等,1998),云杉林地剔除凋落物后的径流量比原林分增加了1.8倍(王金叶等,2008);而Morales等(2000)指出,在凋落物不同厚度情况下(每年春季和夏季对设置的径流小区采取不同程度的烧除处理),地表径流量与凋落物厚度的关系由开始的负线性关系变化为第2年的乘方回归模型,再到第3年转变为负指数回归模型。可见,凋落物阻滞径流的效应不仅受凋落物类型和储量的影响,而且各地不同的降雨条件和产流模式也导致该效应差异显著,但均证明凋落物阻滞地表径流的效应良好。

通过对每个降雨日的观测数据分析,发现橡胶林凋落物阻滞径流的效应主要体现在雨季的前期和中期(5—8月),特别是雨季前期,剔除/对照凋落物径流微小区径流量的比率平均为23,该比率在雨季中期(7—8月)平均也达到7,这是因为在雨季前期,降雨量相对较少,而凋落物基本处于完好状态,能充分发挥截留降雨作用,而7、8月份,不但降雨多,降雨强度大,且此时大量的凋落物已发生分解(野外调查发现,遭割胶踩踏的台地和处于较大坡度上的5号径流小区,其凋落物都明显加快了分解,叶凋落物的分解尤其剧烈),从而使得其阻滞径流的效

应逐步减弱,这种减弱作用在雨季后期(9—10月)表现得尤为明显,该时段降雨量和降雨强度相对不大,但剔除/对照凋落物径流小区径流量比率却显著下降,平均仅为2.4,这其实从定位观测的角度证明了凋落物阻延径流速度与坡度和流量(相当于降雨量)成反比而与凋落物量成正比的结论;因为橡胶人工林在12—翌年1月份集中落叶,而历经7—8个月的分解后,在雨季后期(种子开始大量凋落之前)凋落物的储量可能降至最低(杨曾奖等,1997;任泳红等,1999)。此外,旱季(11—翌年4月)虽然降雨稀少,凋落物亦能很好地将其阻滞,基本不产生地表径流,对缓解旱季水分的缺乏有一定的作用。

1 m²保留凋落物径流微小区(只包含坡地)雨季平均月径流系数为0.111($n = 5$),略<10 m²径流小区(包含1阶坡地和1阶台地)的0.126,但二者的差异并不显著($P > 0.05$),且它们均显著<1 m²剔除凋落物径流微小区的0.435。由此可见,有凋落物覆盖情况下,台地与坡地阻滞径流的效应相当,虽然台地稍上倾的地势有利于拦蓄径流,但对雨季短时间的阵雨来说,被踩踏压实的台地入渗效果并不好。坡地剔除凋落物导致径流系数显著增大,这也说明保护好台地凋落物以发挥阻滞径流效应显得尤为重要。2种小区水平的观测实验均具较好的准确性,但西双版纳橡胶林多处于山地条件,凋落物、立地条件和降雨因素时空异质性较大,所以要全面准确评价橡胶林凋落物阻滞径流的效应,还应建立合适的尺度转换方法。

2.2 凋落物拦截径流泥沙的效应

通过取样分析发现,橡胶林凋落物拦截泥沙的效应显著,2010年7、8和9月份剔除凋落物径流微

表1 橡胶林坡地剔除-对照凋落物径流微小区(1 m²)的径流量($n = 3$)

Table 1 Surface runoff (mean $\pm$ SE) of the slope micro-plots with litter removal and control

时间	降雨量 (mm)	剔除凋落物		保留凋落物		剔除/对照
		径流量 (mm)	径流系数	径流量 (mm)	径流系数	
2009-10	60.9	19.6 $\pm$ 4.1 ^a	0.32	3.8 $\pm$ 1.0 ^b	0.06	5.2
2009-11	18.3	0.3 $\pm$ 0.1	0.02	0	0	—
2009-12	12.1	1.3 $\pm$ 0.2 ^a	0.11	0.2 $\pm$ 0.1 ^b	0.02	6.5
2010-03	45.0	7.3 $\pm$ 1.7 ^a	0.16	0.4 $\pm$ 0.2 ^b	0.01	18.3
2010-04	97.9	16.8 $\pm$ 3.1 ^a	0.17	1.8 $\pm$ 0.3 ^b	0.02	9.3
2010-05	85.5	38.6 $\pm$ 4.8 ^a	0.45	1.0 $\pm$ 0.1 ^b	0.01	38.6
2010-06	265.0	113.5 $\pm$ 4.1 ^a	0.43	13.9 $\pm$ 2.0 ^b	0.05	8.2
2010-07	520.5	230.4 $\pm$ 9.8 ^a	0.44	76.1 $\pm$ 14.7 ^b	0.15	3.0
2010-08	199.0	95.9 $\pm$ 1.0 ^a	0.48	33.3 $\pm$ 4.0 ^b	0.17	2.9
2010-09	208.0	102.2 $\pm$ 2.9 ^a	0.49	47.1 $\pm$ 19.5 ^b	0.23	2.2
总计	1512.2	625.7 $\pm$ 18.5 ^a	0.41	185.1 $\pm$ 72.7 ^b	0.12	3.4

a和b表示剔除与保留凋落物情况下径流量在95%的水平下差异显著($P < 0.01$)。

小区的泥沙含量分别为 10.42 ± 2.47 ($n=9$)、 6.14 ± 1.79 ($n=6$) 和 5.52 ± 1.45 ($n=6$) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别显著 ($P < 0.01$) 高于对照的 1.35 ± 0.40 、 2.28 ± 1.19 和 $(3.79 \pm 1.00) \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这是因为疏松多孔的凋落物对含沙径流起着过滤和拦截作用, 随着雨季的后延, 凋落物拦截泥沙的效果逐步减弱, 这显然与凋落物(主要是叶凋落物)的不断分解有关, 特别针对 5 号和 6 号的取样结果分析发现, 二者在 9 月份的泥沙含量没有显著差异, 因为此时 5 号的凋落物已基本分解完毕, 与剔除凋落物的 6 号状况几乎相同, 可见只有凋落物维持在一定水平时, 才能成为影响径流泥沙含量的主导因素。Zhang 等 (2008) 研究得出, 杉木林径流小区剔除地被物(草本和凋落物)后年土壤流失量是对照的 71 倍, 郭剑芬等 (2006)、Hartanto 等 (2003) 和 Ide 等 (2009) 的研究均证明凋落物拦截径流泥沙的效应十分显著。

经林冠截留重新组合的雨滴对表土形成更大的击溅侵蚀, 加上坡沟区的冲刷, 最终使得径流泥沙浓度显著增大。橡胶林坡地剔除凋落物单位径流量的泥沙浓度显著高于对照, 且与日降雨的最大 1 h 降雨强度呈显著正相关 (图 2), 当降雨强度 $> 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 泥沙浓度均 $> 8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可见降雨强度是土壤侵蚀发生的重要外营力, 尤其当凋落物缺失时, 对径流泥沙就失去了过滤和拦截的功效, 因而形成高含沙水流, 此时最大 1 h 降雨强度有可能成为林地土壤流失最主要的决定性因素。有凋落物覆盖情况下, 径流泥沙浓度与降雨强度并无显著相关关系, 而是单场次降雨 (24 h) 的径流泥沙含量与降雨量呈显著正相关关系 (图 3), 这可能是因为, 凋落

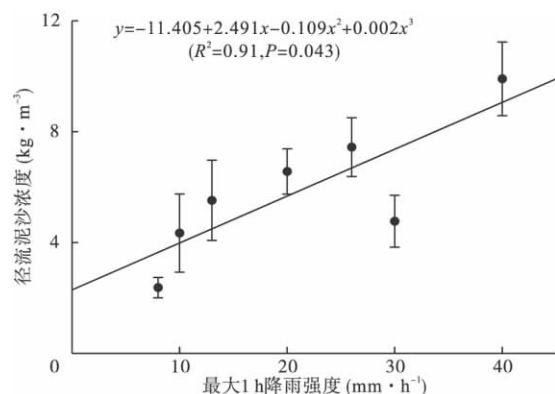


图2 剔除凋落物径流微小区径流泥沙浓度与最大1h雨强的关系

Fig. 2 Relationship between sediment content of runoff and the maximum rainfall intensity within 1 h at the litter removal micro-plots

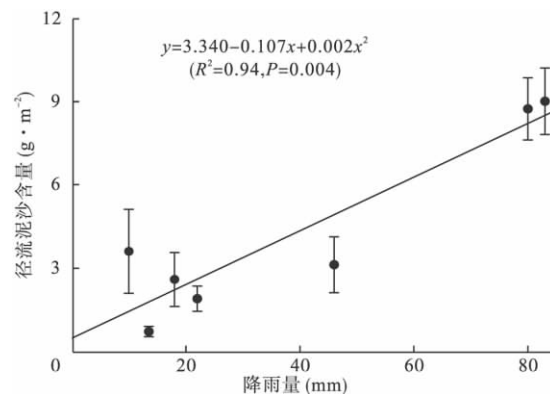


图3 保留凋落物径流微小区径流泥沙含量与降雨量的关系

Fig. 3 Relationship between sediment content of runoff and rainfall (24 hours) at the litter covering micro-plots

物起着保护土壤的屏障作用, 不仅大大削弱了雨滴的击溅侵蚀(即降雨强度侵蚀力的作用被减弱), 还将径流携带的泥沙进行过滤和拦截, 从而使得这种小范围内的土壤流失量显著减少。

2.3 凋落物保持土壤水分的效应

剔除凋落物对橡胶林地浅层土壤湿度产生显著影响, 且季节之间的差异明显 (图 4); 干季的 2—4 月, 剔除凋落物的坡地和台地浅层土壤 (0~10 cm) 湿度均极显著 ($P < 0.001$, $n = 12$) 低于对照, 而且坡地土壤湿度总是显著 ($P < 0.01$, $n = 24$) 高于台地, 可见凋落物在干季抑制土壤水分蒸发的效应较好, 这对橡胶树缓解干季(尤其是 3—4 月)干旱起着重要作用; 特别是干季橡胶林土壤蒸发要显著高于季节雨林 (Liu *et al.* 2008) 的情况下, 凋落物对橡胶林减弱蒸发缓解干旱的作用更是不可或缺。雨季的 6、7 月份, 剔除凋落物对坡地浅层土壤湿度没有显著影响, 而其余各月均会使坡地土壤湿度显著降低 ($P < 0.01$)。这是因为 6、7 月刚剔除凋落物不久, 浅层土壤的下渗能力还未显著改变, 加上此时段降雨已显著增加, 所以其保持水分的能力还相当于有凋落物覆盖的情况。除 8 月 ($P = 0.580$) 外, 剔除凋落物在其余各月均使台地土壤湿度显著降低, 这可能是因为取样时间 (8 月 29 日) 刚好选在连续几个降雨日 (降雨资料显示 8 月 25—27 日均有较强降雨) 之后, 造成剔除凋落物和对照浅层土壤均形成临时饱和带所致, 这也说明凋落物在雨季保持浅层土壤水分的效应在降雨结束的初始阶段往往不明显, Ginter 等 (1979) 还得出剔除凋落物在降雨结束较短时间里会使土壤湿度增大的结论。

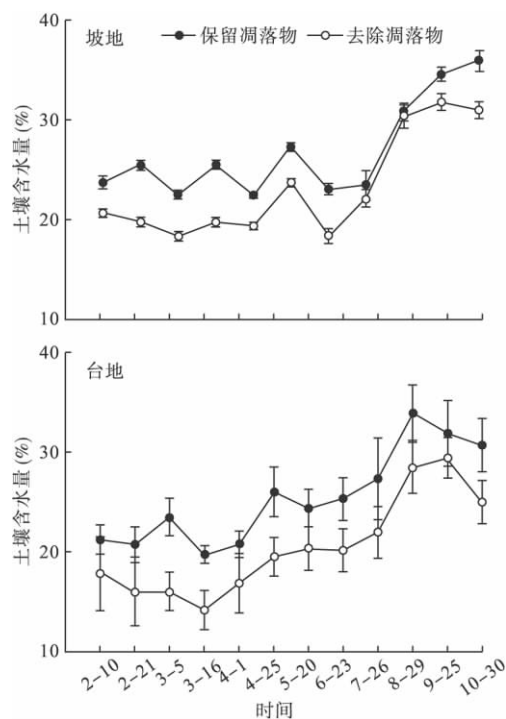


图4 橡胶林浅层土壤(0~10 cm)湿度变化动态
Fig. 4 Gravimetric water content dynamics of the soil (0-10 cm) under a rubber plantation

结果表明,凋落物和地形二者的交互效应在干季的4月和雨季的7月对浅层土壤湿度有显著影响,表现为剔除凋落物台地在4月和7月比保留凋落物台地分别约小7%和6% ($P < 0.001$),可见与坡地缓冲带相比,受人为管理活动频繁的台地是橡胶林地水分更为缺乏的生态脆弱带。频繁的割胶等踩踏活动,不仅使台地凋落物总是处于贴着的倒伏状态,还加快了其分解速率,在雨季中后期常易在台地形成“裸露过道”,造成凋落物和林地土壤保持水分的能力下降,从而易导致橡胶林的部分水文生态功能丧失,甚至会引起橡胶林的相关生态系统服务与功能的衰退。

2.4 凋落物对浅层土壤温度的影响

橡胶林地剔除凋落物地表和10 cm深土壤平均温度在雾凉季(11月—次年2月)比对照分别要低0.4和0.3℃ (t 检验, $P < 0.001$),在干热季(3—4月)比对照分别要高0.7和0.4℃ (t 检验, $P < 0.001$)。由此可见,凋落物对西双版纳的山地橡胶林来说,在雾凉季对表土具有一定的“保温”功效,这对于本身对热量要求高的橡胶树来说,具有一定的抵御低温减缓冷冻害的作用,可见橡胶树集中落叶不仅是树木自身生态适应的需要,还对整个森林生态系统的持续健康发展有重要作用。干热季是橡

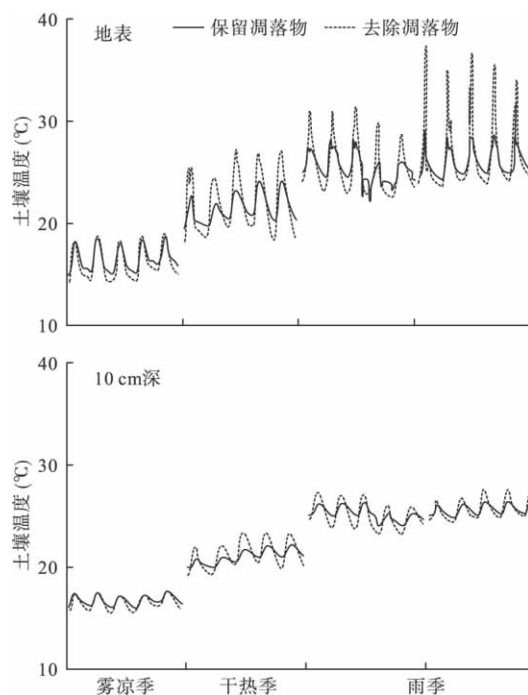


图5 剔除-对照凋落物情况下橡胶林地表层土壤温度日变化动态

Fig. 5 Diurnal temperature fluctuations of the uppermost soil under a rubber plantation

取样时段为:雾凉季 2009年12月11—16日;干热季 2010年4月1—6日;雨季 2010年6月1—6日 8月11—16日。

胶树水分最为缺乏的时段,而3、4月又是橡胶树开始新一轮生长的重要阶段,除了地下水的补给,减少土壤水分蒸发以缓解干旱也是重要的贡献项。有凋落物覆盖情况下,类似于绝热层的凋落物发挥着一定反射和吸收太阳辐射的功效,使得干热季橡胶林表土温度显著降低,因此,在一定程度上抑制了土壤水分蒸发;剔除凋落物土壤湿度在干热季显著高于对照这一结果也证明了其抑制蒸发的效应良好。

剔除凋落物对橡胶林地雨季土壤平均温度没有显著影响 (t 检验, $P > 0.05$),可能是因为雨季高温多雨这一特点将该影响削弱,因为在雨季的5—10月,地处热带的西双版纳太阳辐射强烈,加上部分凋落物已分解,所以凋落物只能截留较少的辐射,导致与到达剔除凋落物林地土壤表面的太阳辐射差异不显著,即林地土壤热通量在剔除与对照情况下没有显著差异,这对橡胶树在这一阶段进行快速产胶和生长活动是有利的。虽然雨季剔除凋落物 and 对照情况下土壤热通量没有显著差异,但其热量动态变化却明显不同,从图5可以看出,剔除凋落物使得林地表土温度产生更大的日变化幅度(尤其是雨季),这

与其他相关研究结论一致(Park *et al.* ,1998; Ogée & Brunet 2002) ,更大的振荡幅度将会导致土壤热量分布在时空上的不均以及温差的显著升高 ,这样不仅会加重土壤水分蒸发 ,还影响土壤生物和橡胶树自身的生理活动(如酶活性等) ,亦有可能阻碍橡胶林生态系统相关的过程与功能作用。

3 讨 论

“冲刷水槽法”模拟实验表明 ,凋落物阻延径流的时间是无覆盖情况下的 5~8 倍 ,随凋落物厚度增加而增加 ,随坡度和径流深的增加而减少(吴钦孝等 ,1998) ;而凋落物滞缓径流速度的效应以凋落物厚度从 0 cm 增加到 0.5 cm 时最为明显(何常清等 ,2006) 。本文选取的西双版纳山地橡胶林 ,其凋落物在干季常处于蓬松状态 ,厚度较大 ,明显增大了橡胶林地的地表糙率 ,为在雨季前期发挥阻滞径流和拦截泥沙的效应提供了重要的物理基础。研究表明 ,其在雨季前期阻滞径流的效应良好 ,剔除-对照凋落物径流微小区的径流量比率在 5—6 月最高;但到了雨季中后期 ,凋落物的不断分解导致其厚度明显下降 ,自身较高的含水率又使其基本处于贴着状态 ,橡胶林地的表面糙率自然也显著下降 ,从而使得水流可接触的空间和面积都变小(野外调查发现 ,此时凋落物的厚度常不足 0.5 cm ,而台地遭频繁踩踏的部分其凋落物更是分解厉害 ,基本处于裸露状态) ,结果表现为剔除-对照径流量比率在 9—10 月显著下降。由此说明 ,橡胶林凋落物在雨季不同阶段阻滞径流的效应差异明显 ,这既受到降雨条件和土壤湿度变化的影响 ,但凋落物储量(厚度) 的剧烈变化以及由此导致的地表糙率下降无疑是其阻滞径流效应显著减弱的重要因素。

西双版纳山地橡胶林地表径流占到总径流量的 45.3% ,在雨季的 6—8 月地表径流量要明显高于地下径流;且橡胶林被踩踏压实的台地可能促使其向超渗产流方式的转变 ,且和热带季节雨林相比 ,更易提前形成径流洪峰(刘玉洪等 ,2002; Liu *et al.* ,2011) ,因而会造成橡胶林地水资源和土壤有机质的流失。本文实验从小尺度(1 m² 径流微小区) 的角度 ,揭示了凋落物阻滞径流和拦截泥沙的效应良好 ,凋落物覆盖正常的坡地径流微小区在 2009 年 10 月—2010 年 9 月的径流量仅为 185.1±72.7 mm ,且各月经流系数和泥沙含量都保持在较低水平 ,这不仅增加了土壤入渗的给水量 ,而且能较好地调节

暴雨洪峰 ,并防止土壤有机质和泥沙被大量冲刷。然而 ,剔除凋落物后 ,导致了橡胶林坡地径流微小区的径流量和泥沙浓度都显著增加 ,这种小范围、短时间(雨季多为阵雨) 内的径流急剧增加 ,橡胶林坡地显然无法在短时间内将其吸收 ,因而会流向下一阶台地;但台地本身就入渗率低 ,其产生的径流将与坡地流下来的径流叠加 ,继而流向下面的坡地和台地(并伴随着对表土有机质和泥沙的强烈冲刷) ;在整个降雨过程中 ,这种连续性的径流叠加现象可能更为明显 ,因而可能造成径流峰值和流域出口断面流量的显著增加 ,也可能造成严重的土壤流失。

西双版纳地区橡胶林干季的土壤蒸发显著强于热带季节雨林(Liu *et al.* ,2008) ,且干季 2—4 月降雨稀少 ,剔除凋落物使得土壤湿度显著降低 ,说明凋落物抑制蒸发的效应较好 ,是橡胶林地保持水分的有利屏障。雨季是橡胶树生长、产胶的重要阶段 ,充足的水分条件必不可缺 ,降雨的补给起着决定性作用 ,但凋落物的拦蓄作用和保持土壤水分的作用亦不容忽视;凋落物缺失导致台地土壤湿度显著降低 ,而且在降雨量最大的 7 月份同样如此。可见 ,受人为管理活动频繁的台地是橡胶林水分缺乏的生态脆弱带 ,更需要凋落物发挥保持水分的功效;若剔除凋落物 ,即使给水充分 ,其浅层土壤湿度也会显著下降 ,不利于树木生长所需水分的供给。凋落物在雾凉季具有一定的“保温”功效 ,在干热季和雨季则能很好地调节表土的极端高温;有凋落物覆盖情况下 ,表土温度的日变化幅度趋于平缓 ,是促进土壤生物和橡胶树自身生理活动稳健发展的有利因素之一。

通过分析橡胶林凋落物相关的生态水文效应及其变化特点和影响因素 ,建议 ,在橡胶林管理和生态系统的恢复过程中 ,一方面要注意改善单一的种植结构 ,合理选择搭配树种 ,以使整个林地获得较大的凋落量 ,从而具备较大的保持水分的物质基础;另一方面 ,更要合理安排人为管理活动 ,如适当减少雨季前期的割胶活动 ,以使凋落物在雨季中后期还能较好地发挥阻滞径流和拦截泥沙等水文功效;同时也要尽量少使用除草剂 ,以增加地被物的组成部分 ,发挥更大的蓄水保土功效。

致 谢 李绍安在野外工作中给予了辛勤帮助 ,本文使用了西双版纳热带森林生态站提供的降雨资料 ,深表感谢。

参考文献

郭剑芬,杨玉盛,林 鹏. 2006. 木荷与杉木人工林枯枝落

- 叶层水文生态功能. 东北林业大学学报, **34**(4): 49–52.
- 何常清, 于澎涛, 管伟, 等. 2006. 华北落叶松凋落物覆盖对地表径流的拦阻效应. 林业科学研究, **19**(5): 595–599.
- 李国华, 田耀华, 倪书邦, 等. 2009. 橡胶树生理生态学研究进展. 生态环境学报, **18**: 1146–1154.
- 刘玉洪, 张一平, 马友鑫, 等. 2002. 西双版纳橡胶人工林地地表径流与地下径流的关系. 南京林业大学学报(自然科学版), **26**(1): 75–77.
- 任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 1999. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究. 植物生态学报, **23**(5): 418–425.
- 王金叶, 于澎涛, 王彦辉, 等. 2008. 森林生态水文过程研究——以甘肃祁连山水源涵养林为例. 北京: 科学出版社.
- 王佑民. 2000. 中国林地枯落物持水保土作用研究概况. 水土保持学报, **14**(4): 108–113.
- 王云琦, 王玉杰. 2010. 三峡库区典型森林植被生态水文功能. 生态学杂志, **29**(10): 1892–1900.
- 吴钦孝, 刘向东, 陈云明, 等. 2005. 森林保持水土机理及功能调控技术. 北京: 科学出版社.
- 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 等. 1998. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土作用的评价. 土壤侵蚀与水土保持学报, **4**(2): 23–28.
- 杨曾奖, 郑海水, 周再知, 等. 1997. 橡胶间种砂仁模式下凋落物的特征. 广东林业科技, **13**(4): 19–24.
- 袁梦仙, 李琳, 李凤英. 2004. 坡面植被凋落物层的拦沙效应试验研究. 江西农业大学学报, **26**(5): 798–800.
- 张卫强, 贺康宁, 周毅, 等. 2007. 黄土半干旱区刺槐林地土壤蒸发特性研究. 水土保持研究, **14**(6): 396–400.
- 张振明, 余新晓, 牛健植, 等. 2005. 不同林分凋落物层的水文生态功能. 水土保持学报, **19**(3): 139–143.
- 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 2003. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究. 林业科学, **39**(1): 168–172.
- 周卫卫, 余雪标, 王旭, 等. 2009. 海南琼中3种森林凋落物的现存量及持水特性研究. 安徽农业科学, **37**(13): 6236–6239.
- 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 等. 2002. 森林凋落物层水文生态功能研究. 北京林业大学学报, **24**(5/6): 30–34.
- Ginter DL, Mcleod KW, Sherrod CJ. 1979. Water stress in longleaf pine induced by litter removal. *Forest Ecology and Management*, **2**: 13–20.
- Hartanto H, Prabhu R, Widayat A, et al. 2003. Factors affecting runoff and soil erosion: Plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *Forest Ecology and Management*, **180**: 361–374.
- Hou XL, Duan CQ, Tang CD, et al. 2010. Nutrient relocation, hydrological functions, and soil chemistry in plantations as compared to natural forests in central Yunnan, China. *Ecological Research*, **25**: 139–148.
- Ide J, Kume T, Wakiyama Y, et al. 2009. Estimation of annual suspended sediment yield from a Japanese Cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantation considering antecedent rainfalls. *Forest and Ecology Management*, **257**: 1955–1965.
- Li HM, Ma YX, Aide TM, et al. 2008. Past, present and future land-use in Xishuangbanna, China and the implications for carbon dynamics. *Forest Ecology and Management*, **255**: 16–24.
- Liu WJ, Liu WY, Li JT, et al. 2008. Isotope variations of throughfall, stemflow and soil water in a tropical rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW China. *Hydrology Research*, **39**: 437–449.
- Liu WJ, Liu WY, Lu HJ, et al. 2011. Runoff generation in small catchments under a native rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, southwestern China. *Water and Environment Journal*, **25**: 138–147.
- Marthews TR, Burslem DFRP, Paton SR, et al. 2008. Soil drying in a tropical forest: Three distinct environments controlled by gap size. *Ecological Modelling*, **216**: 369–384.
- Morales HA, N  var J, Domínguez PA. 2000. The effect of prescribed burning on surface runoff in a pine forest stand of Chihuahua, Mexico. *Forest Ecology and Management*, **137**: 199–207.
- Og  e J, Brunet Y. 2002. A forest floor model for heat and moisture including a litter layer. *Journal of Hydrology*, **255**: 212–233.
- Og  e J, Lamaud E, Brunet Y, et al. 2001. A long-term study of soil heat flux under a forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, **106**: 173–187.
- Park HT, Hattori S, Tanaka T. 1998. Development of a numerical model for evaluating the effect of litter layer on evaporation. *Journal of Forest Research*, **3**: 25–33.
- Ponge JF, Arpin P, Vannier G. 1993. Collembolan response to experimental perturbations of litter supply in a temperate forest ecosystem. *European Journal of Soil Biology*, **39**: 141–153.
- Sayer EJ. 2006. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, **81**: 1–31.
- Zhang JC, Zhuang JY, Su JS, et al. 2008. Development of GIS-based FUSLE model in a Chinese fir forest sub-catchment with a focus on the litter in the Dabie Mountains, China. *Forest Ecology and Management*, **255**: 2782–2789.
- Zhou GY, Morris JD, Yan JH, et al. 2002. Hydrological impacts of reforestation with eucalypts and indigenous species: A case study in southern China. *Forest Ecology and Management*, **167**: 209–222.

作者简介 卢洪健 男, 1985年生, 硕士研究生, 研究方向为森林水文学和生态水文功能评价. E-mail: arron_lu1985@163.com

责任编辑 王伟