

橡胶凋落叶覆盖对胶园土壤部分理化性质的影响

薛欣欣¹, 吴小平¹, 罗微¹, 魏云霞², 罗雪华¹,
王文斌¹, 王大鹏¹, 张永发¹, 赵春梅¹

(1.中国热带农业科学院土壤肥料研究中心, 农业农村部橡胶树生物学与遗传资源利用重点实验室,
省部共建国家重点实验室培育基地—海南省热带作物栽培生理学重点实验室,
中国热带农业科学院橡胶研究所, 海口 571101; 2.中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海口 571101)

摘要: 通过田间原位试验, 研究橡胶凋落叶覆盖对平地 and 坡地胶园表层土壤理化性质的影响。试验设置平地凋落叶覆盖、平地凋落叶去除、坡地凋落叶覆盖和坡地凋落叶去除 4 个处理。结果表明: (1) 平地胶园表层土壤含水率大于坡地, 凋落叶覆盖较凋落叶去除的坡地土壤含水率显著增加; (2) 表层土壤含水率与降雨量呈线性正相关关系, 方程斜率表现为坡地大于平地; (3) 平地 and 坡地凋落叶覆盖较其凋落叶去除的土壤 pH 分别提高了 0.09~0.74 和 -0.09~0.47 个单位; (4) 与凋落叶去除相比, 凋落叶覆盖的有机碳、全氮和碳氮比均有所增加, 平地增幅分别为 6.9%~68.5%, 3.0%~44.8%, 3.9%~16.2%, 坡地增幅分别为 23.3%~95.0%, 3.5%~52.5%, 7.6%~27.9%, 坡地增幅大于平地; (5) 与凋落叶去除相比, 凋落叶覆盖显著提高平地土壤有效磷含量, 增幅为 6.2%~48.1%, 显著提高平地 and 坡地速效钾含量, 增幅分别为 16.4%~83.3% 和 12.8%~94.8%。综上所述, 橡胶凋落叶覆盖可以缓解胶园 pH 酸化, 增加土壤保水能力, 改善土壤养分状况。

关键词: 橡胶林生态系统; 凋落叶覆盖; 土壤理化性质; 平地; 坡地

中图分类号: S157.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)01-0301-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.043

Effects of Leaf Litter Decomposition on Soil Partial Physicochemical Properties in the Rubber Plantation

XUE Xinxin¹, WU Xiaoping¹, LUO Wei¹, WEI Yunxia², LUO Xuehua¹,
WANG Wenbin¹, WANG Dapeng¹, ZHANG Yongfa¹, ZHAO Chunmei¹

(1. Soil and Fertilizer Research Center, Key laboratory of Biology and Genetic Resources of Rubber Tree, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, State Key Laboratory Incubation Base for Cultivation & Physiology of Tropical Crops, Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101;
2. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101)

Abstract: In order to reveal the effects of rubber litter covered on the surface soil physiochemical properties in different slop gradient, a field experiment was conducted. The four experimental treatments included leaf litter covered and litter removed in flat land, leaf litter covered and litter removed in slope land, respectively. The results showed that: (1) The soil water contents in flat land were higher than that in slope land during litter decomposition, moreover, it increased significantly at the treatments of litter covered compared with the treatments of litter removed in the condition of slope land. (2) There was a linear positive correlation between surface soil water content and precipitation, while the equation slop of slope land was larger than the flat land condition. (3) Treatments of litter covered in flat land and slope land increased the pH values by 0.09 ~ 0.74 and -0.09 ~ 0.47 units, respectively. (4) Total organic carbon, total nitrogen and C/N of treatments of litter covered increased significantly by 6.9% ~ 68.5%, 3.0% ~ 44.8%, 3.9% ~ 16.2% respectively in flat land and 23.3% ~ 95.0%, 3.5% ~ 52.5%, 7.6% ~ 27.9% respectively in slope land.

收稿日期: 2019-05-27

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0201100); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项(1630022019021); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项(1630022017006); 海南省重点研究计划项目(ZDYF2018240)

第一作者: 薛欣欣(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事橡胶树养分管理研究。E-mail: xuexinxin_2010@163.com

通信作者: 吴小平(1960—), 男, 硕士生导师, 主要从事橡胶树养分管理研究。E-mail: wxp166@163.com

compared with these of litter removed, while the increase rate in slope land was greater than that in flat land. (5) Compared with the treatments of litter removed, the treatments of litter covered increased significantly soil available phosphorus contents in slope land condition by 6.2% ~ 48.1%, however, increased significantly soil available potassium contents in flat land by 16.4% ~ 83.3% and in slope land by 12.8% ~ 94.8%. In conclusion, rubber leaf litter covered could alleviate soil acidification, increase the water retention capacity and improve the conditions of soil nutrients.

Keywords: rubber forest ecosystem; leaf litter; soil physicochemical property; flat land; slope land

凋落物不仅作为营养物质的重要储存库,对森林生态系统养分循环、生产力维持具有重要作用^[1], 同时也在降雨截留、涵养水源、阻缓径流以及抑制蒸发方面起到不可替代的生态学作用^[2-3]。已有研究^[4]表明,森林生态系统中,净第一性生产力的 50%~99% 以凋落物的形式通过分解系统的分解回归到土壤,实现养分和物质的再循环。凋落叶的分解肩负着森林生态系统养分和能量的供应,也是作为土壤有机养分积累和碳平衡的关键环节^[5-6]。因此,充分理解森林凋落物的分解,实现森林生态系统的自肥作用,对森林培育具有十分重要的意义。

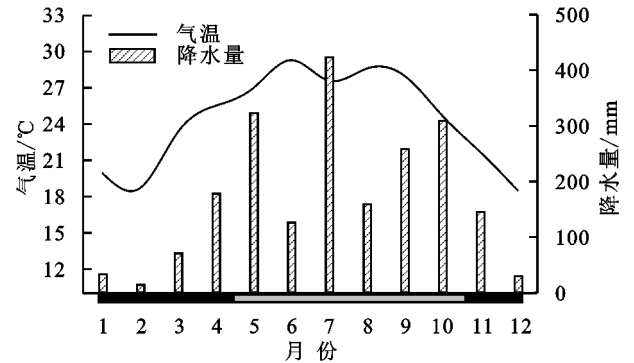
橡胶林生态系统作为一个开放的人工生态系统,是我国热带地区重要的经济人工林生态系统类型之一,每年有大量的枯枝枯叶凋落,进而在该系统中分解、循环。有研究^[7]表明,4~28 龄橡胶树凋落物年产量为 2.65~10.82 t/hm²,其中凋落叶占凋落物总量的 60%~90%;凋落物氮、磷、钾年养分归还量分别为 40.0~163.0,1.2~6.4,12.9~84.5 kg/hm²。由此可见,橡胶树凋落物储存的营养物质对生产实践中合理施肥具有指导意义。以往研究^[8-9]重点关注凋落物的分解速率及其对环境因素的响应,而针对凋落物分解期间土壤理化性质动态变化的关注较少。我国植胶区环境复杂,平地、丘陵及山地并存,前期研究^[10]发现,受降雨、水分、光照等因素的影响,平地 and 坡地条件下凋落叶的分解速率、养分释放规律存在明显的差异,但橡胶全生产周期内凋落叶分解对土壤理化性质的影响仍不清楚。因此,本研究选取平地和坡地不同地形条件,系统分析凋落叶覆盖下胶园土壤理化性质的动态变化及其差异,以期为我国橡胶园养分高效管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于海南省儋州市中国热带农业科学院试验场,地处 109°49'E,19°48'N,该地区处于东亚大陆季风气候的南缘,属热带湿润季风气候,5—10 月为雨季,11 月至翌年 4 月为干季,年均日照时间 2 000 h 以上,年均

气温为 23.5℃,年均降水量为 1 623 mm,其中 2017 年年均气温和年均降水量分别为 24.4℃和 2 068.6 mm(图 1)^[11]。该地区由丘陵、平原和山地 3 部分构成,丘陵占 76.50%,平原占 23.13%,山地占 0.37%,海拔大部分在 200 m 以下。土壤类型为花岗岩发育的砖红壤,主要人工林植被类型为天然橡胶林。



注:横坐标底部黑色和灰色柱子分别表示旱季和雨季

图 1 试验点 2017 年气候条件

1.2 试验设计

2017 年 3 月(橡胶树落叶期)在试验林地采用落叶收集器(长宽高 1 m×1 m×1 m 的尼龙网制成,离地面 50 cm)收集橡胶树自然凋落叶,将其带回实验室并进行风干备用。准确称取 10 g,装进 10 cm(宽)×20 cm(长)的 1 mm²孔径的的尼龙网袋中,备用。

试验从 2017 年 4 月 1 日开始,在试验林地选择平地和坡地(坡度约 20°)相邻的 2 块管理一致的橡胶园,橡胶树株行距为 3 m×7 m,2 块试验样地面积约为 200 m²。供试林地橡胶树于 2006 年定植,品种为“热研 7—33—97”,树围约 60.0 cm,郁闭度 85%,林下主要植被为假蒟。土壤基本理化性质见表 1。试验设 4 个处理:(1)平地凋落叶去除(CK_F);(2)平地凋落叶覆盖(T_F);(3)坡地凋落叶去除(CK_S);(4)坡地凋落叶覆盖(T_S)。平地和坡地尼龙网袋分别为 72 袋,每个处理 3 次重复凋落叶。覆盖处理是将已装好凋落叶的尼龙网袋均匀放置于橡胶树行间距树干约 1 m 的位置,并固定,要求尼龙网袋与土壤平行接触,各尼龙网袋间距约 50 cm,尼龙网袋放置前将地表原有的凋落物清除干净;凋落叶去除处理是将凋落叶人为去除后的裸露地块。凋落叶初始养分含量为碳 43.81%,氮

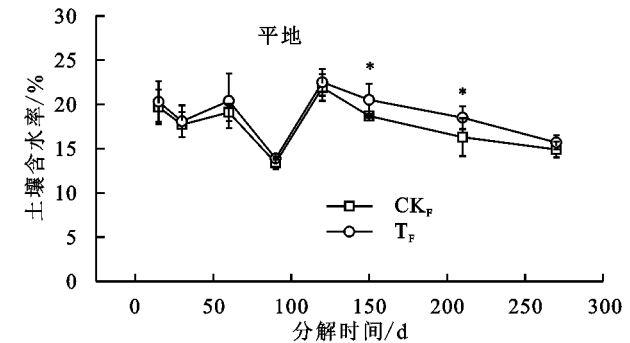
1.75%,C/N 25.03,磷 0.114%,钾 1.207%。

1.3 土壤样品采集与测定

试验开始后,分别于 15, 30, 60, 90, 120, 150, 210,270 天采集落叶去除处理和覆盖处理尼龙网袋下的表层(0—10 cm)土壤样品,带回实验室,风干,过筛后采用常规方法^[12]测定土壤理化性质。含水率采用烘干法测定;pH 采用电位法,水土比 2.5 : 1,酸度计测定;土壤有机碳采用重铬酸钾—容量法测定;全氮采用硫酸—双氧水消煮、凯氏法测定;有效磷采用盐酸—氟化铵法测定;速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度计法测定(表 1)。

表 1 土壤基础理化性质

地形	pH	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	C/N	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
平地	4.60	14.5	0.92	15.8	2.77	75.8
坡地	5.12	12.5	0.73	17.1	2.56	73.2



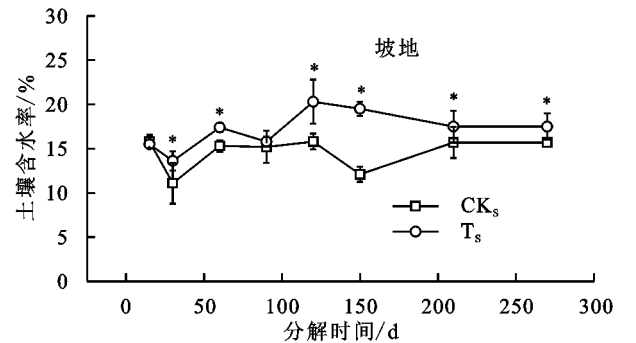
1.4 数据统计方法

数据采用 Origin 8.0 绘图,SPSS 20.0 软件进行统计分析,LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤自然含水率

由图 2 可知,凋落叶分解期间,凋落叶去除处理的表层土壤自然含水率变幅分别为 13.4%~21.9%和 11.1%~15.8%,凋落叶覆盖处理变幅分别为 13.9%~22.5%和 13.6%~20.3%,土壤含水率最大值均在 7 月,平地含水率高于坡地。与凋落叶去除处理(CK_F和 CK_S)相比,凋落叶覆盖处理均不同程度增加了土壤自然含水率,平地(T_F)和坡地(T_S)增幅分别为 2.2%~13.4%和 -2.2%~61.2%,坡地含水率增幅高于平地。



注: * 表示在 P < 0.05 水平上差异显著。下同。

图 2 凋落叶分解过程中土壤含水率的变化

土壤自然含水率与当月降雨量间的线性回归分析(图 3)。本文将线性方程的斜率作为土壤持水能力的判断依据,由各线性方程的斜率可以看出,平地条件下的斜率(0.015 9,0.016 9)明显高于坡地(0.004 1,0.006 9),凋落叶覆盖处理的斜率则高于凋落叶去除处理,同时,凋落叶覆盖较凋落叶去除处理的斜率增幅表现为坡地大于平地。

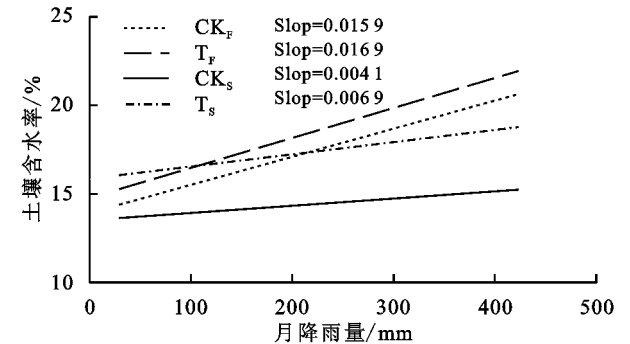


图 3 土壤含水率与降雨量的关系

2.2 土壤 pH

由图 4 可知,随凋落叶分解时间推进,平地 and 坡地的 pH 变化规律存在异同,平地呈“单峰”的变化特征,而坡地则呈“双峰”的变化特征,但二者均在分解

后 60 天出现最大峰值。平地 and 坡地凋落叶去除处理的 pH 变幅分别为 4.54~5.21 和 4.66~5.44,而凋落叶覆盖处理变幅分别为 4.67~5.73 和 4.91~5.67。与凋落叶去除处理相比,凋落叶覆盖处理的 pH 均有所提高,平地 and 坡地分别提高了 0.09~0.74 和 -0.09~0.47 个单位,平地增幅大于坡地。

2.3 有机碳、全氮和 C/N 比

由图 5 可知,随分解时间推进,胶园土壤平地 and 坡地条件下的土壤有机碳、全氮和碳氮比的变化波动较大。平地胶园凋落叶去除和覆盖条件下土壤有机碳含量变幅分别为 6.22%~10.63%和 8.79%~12.65%,全氮含量变幅分别为 6.16%~11.18%和 8.68%~12.35%,碳氮比变幅分别为 9.15~11.38 和 9.69~11.74;坡地胶园凋落叶去除和覆盖条件下的土壤有机碳变幅分别为 5.50%~7.92%和 7.99%~12.14%,全氮含量变幅分别为 6.49%~8.03%和 7.74%~11.02%,碳氮比变幅分别为 7.61~10.85 和 9.73~12.04;平地胶园土壤有机碳和全氮含量整体高于坡地。与凋落叶去除处理相比,凋落叶覆盖处理的土壤有机碳含量、全氮含量以及碳氮比均有不同程

度的增加,平地条件下增幅分别为6.9%~68.5%,3.0%~44.8%,3.9%~16.2%,而坡地条件下增幅分

别为23.3%~95.0%,3.5%~52.5%,7.6%~27.9%,坡地增幅大于平地。

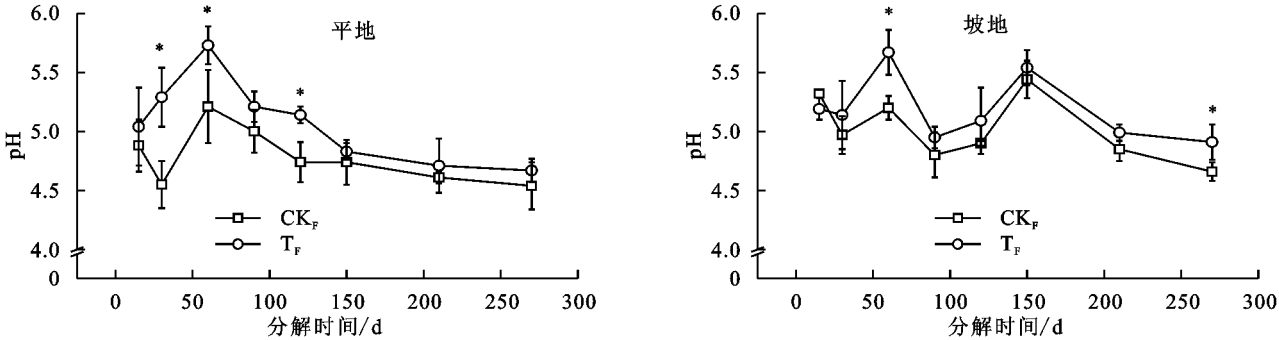


图 4 凋落叶分解过程中土壤 pH 的变化

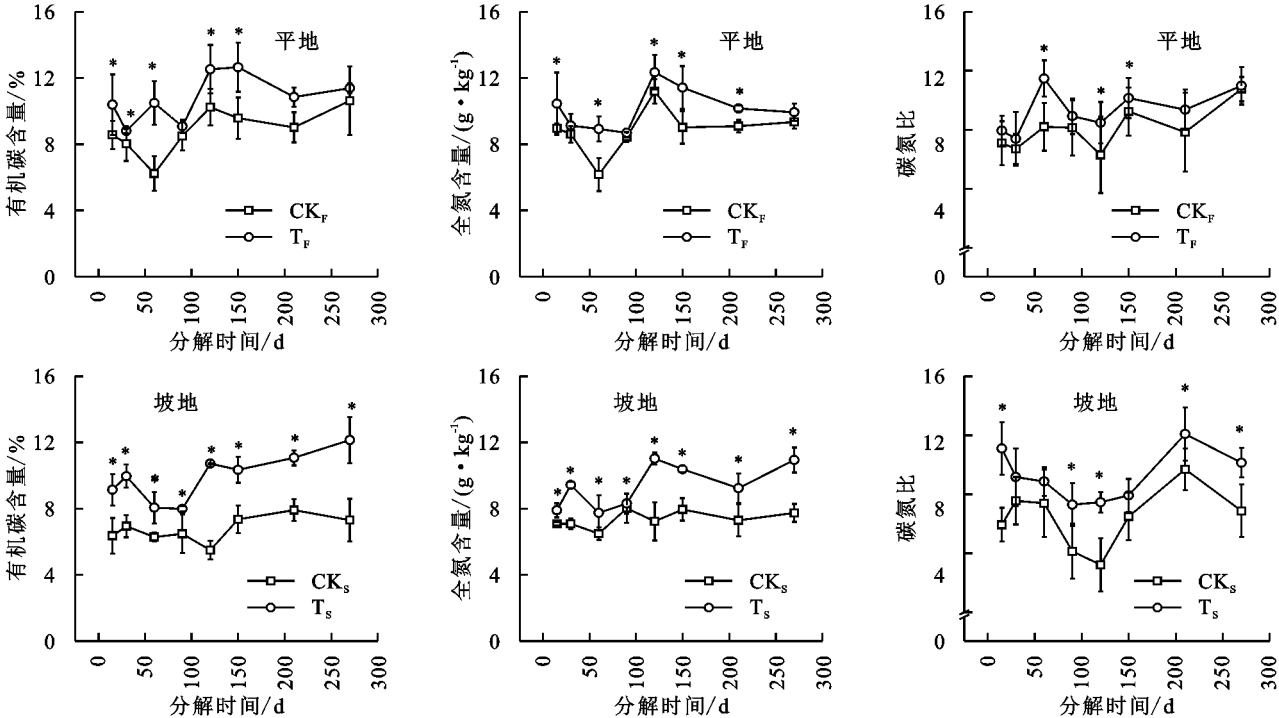


图 5 凋落叶分解过程中土壤有机碳、全氮和 C/N 的变化

2.4 速效磷和速效钾

由图 6 可知,平地条件下,凋落叶覆盖对表层土壤有效磷和速效钾(15~150 天)均有不同程度的提高作用,增幅分别为 6.2%~48.1%,16.4%~83.3%;坡地条件下,凋落叶覆盖对表层土壤有效磷无显著影响,而对分解前期的土壤速效钾有显著提高(15~150 天)的作用,增幅则为 12.8%~94.8%。平地和坡地条件下,随分解时间推进,CK 处理速效钾在 30 天之后波动较小,而凋落叶覆盖条件下的 T_F和 T_S处理则表现为下降的趋势。

3 讨论

3.1 凋落物覆盖的水文效应

森林凋落物层是森林生态系统的重要组成部分,由于其具有较多的微孔隙,有较强固持水分的能力,其覆盖于地表可抵挡降雨的击溅、阻缓径流、拦蓄泥沙、减轻面蚀等,同时还能抑制土壤水分的蒸发,起到

很好的蓄水保水作用^[13]。

以往研究^[14]表明,0—10 cm 土层土壤含水率最高,该土层持水性能较强,加之该土层与凋落物直接接触并受影响最大,基于以上几点考虑,本文以橡胶园 0—10 cm 表层土壤为分析对象。通过本研究发现,土壤含水率与降雨量呈正相关关系,最大含水率出现在降雨量最高的 7 月,该结果与前人^[15]研究结果相似。另外,橡胶凋落叶覆盖可明显提高表层土壤的含水率,平地增幅最高可达 13.4%,坡地增幅最高可达 61.2%,坡地条件下凋落叶覆盖的保水作用比平地条件下显著增强。王冬等^[16]研究表明,具有凋落物的处理能够有效延缓地表径流的产生,耕地退耕后凋落物的增加显著改善了地表土壤的持水能力,提高了表层土壤含水量,同时还显著降低了土壤表层水分的蒸发。周丽丽等^[17]研究表明,老林龄的杉木凋落物层具有现存量、持水量、吸水速率等特

点,具有较强的生态水文功能。林地去除凋落物层后,油松林地径流量比原林分增加了 1.96 倍,冲刷量增加了 2.87 倍;山杨林地径流量比原林分增加了 1.67 倍,冲刷量增加了 8.15 倍^[18]。本研究位于我国

南端的海南省境内,该区域年降雨量大,植胶区域地形复杂多变,以丘陵地居多,水土流失风险大,因此,橡胶生态系统中凋落物覆盖有利于涵养水源、减少水土流失。

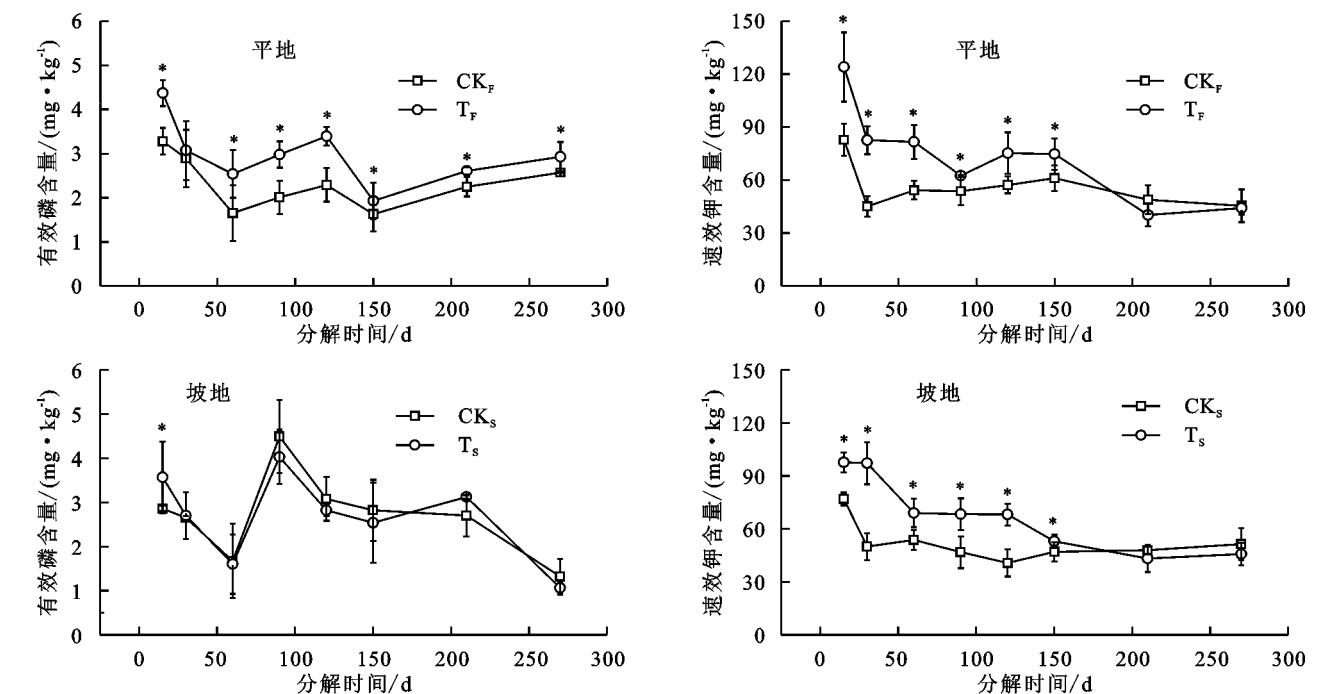


图 6 凋落叶分解过程中土壤有效磷和速效钾的变化

3.2 凋落物覆盖有利于缓解土壤酸化

土壤 pH 决定了土壤酸碱状况,是土壤重要的化学性质,影响着土壤生态环境^[19]。本研究表明,与凋落叶去除处理相比,凋落叶覆盖处理表层土壤 pH 均有所提高,平地 and 坡地分别提高了 0.09~0.74 和 -0.09~0.47 个单位。该结果与汪思龙等^[20]的研究结果相似,其研究表明凋落叶覆盖下 pH 增加究其原因主要是凋落叶分解释放大量的盐基离子进入土壤,提高了土壤的盐基饱和度,而盐基饱和度是与土壤酸度有关的主要化学性质之一,盐基饱和度的提高标志着土壤增强了对酸化的缓冲能力;凋落叶释放出有机碳进入土壤,提高了土壤有机碳含量,意味着土壤阳离子交换量的增加,因此也可以解释凋落叶覆盖提高了土壤对酸化的缓冲能力。同时,有机质的增加还可通过 Al-有机螯合物来减轻土壤酸化。另外,黄容等^[19]研究了秸秆覆盖对 pH 也有明显提高作用,尤其是在秸秆全量还田对 pH 改善效果最佳。由此可见,凋落叶(植物残体)覆盖下的土壤酸化程度降低,土壤对酸化的缓冲能力得到提高。

3.3 凋落物覆盖改善土壤养分状况

本研究表明,与凋落叶去除处理相比,凋落叶覆盖处理下平地 and 坡地有机碳增幅分别为 6.9%~68.5% 和 23.3%~95.0%。土壤有机碳是评价土壤肥力的重要指标,橡胶凋落物含有丰富的有机成分和营养元

素,其中有机碳含量达 40% 以上^[9]。凋落物覆盖后有利于微生物的繁殖,形成微生物的活动层,进而促进了对凋落物有机态养分的释放,从而增加土壤有机碳含量^[21]。陈平等^[22]研究表明,添加凋落物可以提高土壤有机碳含量并促进其向微生物量碳的转化效率,进而增加了土壤中可以植物吸收利用的速效养分,这对提高土壤生产力具有重要作用,进一步影响森林生态系统碳循环进程。本研究还表明,凋落叶覆盖可不同程度提高土壤全氮和速效养分含量,其中有效磷和速效钾在凋落叶分解前期的增幅较大,后期降低,该结果较好地印证了前期研究的凋落叶分解规律^[10]。另外,地形是土壤形成和发育的关键控制因子,影响着土壤养分状况。本研究发现,不同地形条件下凋落叶覆盖对土壤养分的影响程度存在差异,平地胶园表层土壤有机碳和全氮等养分状况优于坡地,地形因子与土壤之间主要通过径流、侵蚀和生物循环引起的物质与能量的空间再分配,进而影响土壤养分的积累和循环过程,然而土壤养分往往与坡度呈负相关^[23-24]。综上所述,凋落叶覆盖使土壤有机碳、全氮提高,但仅局限于表观现象,如何解释土壤碳、氮的增加机制还需进一步研究。

4 结论

(1) 橡胶凋落叶覆盖使土壤 pH、含水率、有机碳、全氮以及速效养分得到明显的提高,有利于缓解

土壤酸化,提高土壤保水能力,改善土壤养分状况。

(2)土壤自然含水率与降雨量呈正相关关系,坡地凋落叶覆盖含水率增幅大于平地;凋落叶覆盖条件下土壤有机碳和全氮含量增幅表现为坡地大于平地,而 pH 和速效养分含量增幅却表现为平地大于坡地。

(3)凋落叶覆盖条件下,土壤速效钾含量随分解时间推进呈逐渐降低的趋势,分解前期由于凋落物钾离子的释放,土壤速效钾显著高于凋落叶去除处理,后期增幅逐渐减小。

参考文献:

- [1] Xue F, Zhao M F, Wang Y H, et al. Base cation concentrations in forest litter and topsoil have different responses to climate and tree species along elevational gradients [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16 (1): 30-42.
- [2] 王波,张洪江,杜士才,等.三峡库区天然次生林凋落物森林水文效应研究[J].*水土保持通报*, 2009, 23(3): 83-87.
- [3] Gabarrón-Galeote M A, Martínez-Murillo J F, Ruiz-Sinoga J D. Relevant effects of vegetal cover and litter on the soil hydrological response of two contrasting Mediterranean hillslopes at the end of the dry season (south of Spain) [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26 (11): 1729-1738.
- [4] Schlesinger W H. Biogeochemistry: An analysis of global change[J]. *Quarterly Review of Biology*, 1997, 54(4): 353-423.
- [5] Austin A T, Ballaré C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(10): 4618-4622.
- [6] 张鹏.亚热带森林土壤分解酶活性的季节变化及凋落物分解的研究[D].南京:南京大学, 2007.
- [7] 曹建华,陶忠良,赵春梅,等.不同树龄橡胶树枯落物养分归还比较[J].*热带作物学报*, 2011, 32(1): 1-6.
- [8] 赵春梅,曹建华,李晓波,等.橡胶林枯落物分解及其氮素释放规律研究[J].*热带作物学报*, 2012, 33(9): 1535-1539.
- [9] N'Dri J K, Guéi A M, Edoukou E F, et al. Can litter production and litter decomposition improve soil properties in the rubber plantations of different ages in Cote d'Ivoire? [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 111 (2): 203-215.
- [10] 薛欣欣,吴小平,王文斌,等.坡度和埋深对橡胶林凋落叶分解及红外光谱特征的影响[J].*生态学报*, 2019, 39 (3): 121-130.
- [11] 中国气象数据网.中国地面气候资料月值数据集[EB/OL]. [2019-04-10]. <http://data.cona.cn/site/indet.html>.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- [13] 罗雷,何丙辉.森林凋落物的水文生态效应浅议[J].*水土保持应用技术*, 2005(5): 12-16.
- [14] 朱丽琴,黄荣珍,李凤,等.红壤侵蚀地植被恢复后土壤水分特征及其凋落物碳归还模式[J].*水土保持通报*, 2015, 35(5): 1-6.
- [15] 包贺喜吐.草地雀麦种植对坡地土壤水分动态变化的影响[J].*中国草地学报*, 2010, 32(3): 39-44.
- [16] 王冬,杨政,郝红敏,等.黄土区退耕草地凋落物-土壤界面水分过程特征研究[J].*水土保持研究*, 2015, 22(1): 80-84.
- [17] 周丽丽,蔡丽平,马祥庆,等.不同发育阶段杉木人工林凋落物的生态水文功能[J].*水土保持学报*, 2012, 26 (5): 249-253.
- [18] 朱金兆,刘建军,朱清科,等.森林凋落物层水文生态功能研究[J].*北京林业大学学报*, 2002, 24(增刊 1): 30-34.
- [19] 黄容,高明,万毅林,等.秸秆还田与化肥减量配施对稻—菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J].*环境科学*, 2016, 37(11): 4446-4456.
- [20] 汪思龙,陈楚莹.森林凋落物对土壤酸化缓冲作用的初步研究[J].*环境科学*, 1992, 13(5): 25-30.
- [21] Riutta T, Slade E M, Bebbler D P, et al. Experimental evidence for the interacting effects of forest edge, moisture and soil macrofauna on leaf litter decomposition [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 49 (6): 124-131.
- [22] 陈平,赵博,杨璐,等.接种蚯蚓和添加凋落物对油松人工林土壤养分和微生物量及活性的影响[J].*北京林业大学学报*, 2018, 40(6): 63-71.
- [23] Sumfleth K, Duttman R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators [J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(5): 485-501.
- [24] Zhang W, Chen H S, Wang K L, et al. The heterogeneity and its influencing factors of soil nutrients in peak-cluster depression areas of karst region [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(3): 322-329.