

西双版纳地区不同胶农复合林对土壤理化性质的影响

朱 凯^{1,2}, 刘文杰¹, 刘佳庆^{1,2}, 朱习爱^{1,2}, 陈春峰^{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 勐仑 666303; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 对云南西双版纳地区橡胶-大叶千斤拔、橡胶-可可、橡胶-茶叶、橡胶-龙血树 4 种较典型的胶农复合林和单层橡胶林的土壤理化性状进行研究, 并利用主成分分析法评价, 揭示不同胶农复合林的土壤特性差异, 为单层橡胶林的胶农复合林改造提供理论依据。结果表明, 单层橡胶林的土壤有机质含量、土壤容重、土壤含水量、土壤总孔隙度及土壤导水率与橡胶-大叶千斤拔、橡胶-可可、橡胶-茶叶、橡胶-龙血树等 4 种胶农复合林土壤的相应指标均具有显著性差异($P<0.05$); 单层橡胶林改造为胶农复合林后, 土壤有机质含量和全氮含量增加幅度分别为 21.3%~50.1%和 26.2%~39.9%, 同时土壤容重降低, 土壤孔隙度增加, 土壤含水量与导水率显著增加。在西双版纳地区, 将单层橡胶林改造为胶农复合林可提高土壤肥力、保持水土, 是较理想的生态农业模式。

关键词: 土壤理化性质; 单层橡胶林; 胶农复合林

Doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2016.04.008

中图分类号: S718.51 文献标识码: A 文章编号: 1009-7791(2016)04-0337-06

Effects of Different Types of Rubber-Based Agroforestry Ecosystems on Soil Physicochemical Properties in Xishuangbanna

ZHU Kai^{1,2}, LIU Wen-jie¹, LIU Jia-qing^{1,2}, ZHU Xi-ai^{1,2}, CHEN Chun-feng^{1,2}

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

Abstract: To study effects of different types of rubber-based agroforestry ecosystems on soil physicochemical properties, soil samples from four rubber-based (*Hevea brasiliensis*) agroforestry ecosystems with different interplants (*Camellia sinensis*, *Theobroma cacao*, *Flemingia macrophylla* and *Dracaena americana*) and rubber monoculture in Xishuangbanna were analyzed and their physicochemical properties were comprehensively evaluated by principal component analysis (PCA), which provided a scientific basis of conversion rubber monoculture to rubber-based agroforestry ecosystem. The results showed that the soil water content, soil organic matter(SOM), soil bulk density, total soil porosity and soil hydraulic conductive in rubber monocultures were significantly different($P<0.05$). In addition, after conversion rubber monoculture to rubber-based agroforestry ecosystem, the content of SOM and total nitrogen increased by 21.3%—50.1% and 26.2%—39.9%, respectively. Meanwhile the values of bulk density decreased and soil water content, total soil porosity, soil hydraulic conductive increased greatly. It was further showed that conversing rubber monoculture to rubber-based agroforestry ecosystem was sustainable ways which could not only improve soil fertility but also conserve soil and water in Xishuangbanna.

Key words: soil physicochemical property; rubber monoculture; rubber-based agroforestry ecosystem

收稿日期: 2016-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(41271051、31170447); 云南省应用基础研究重点项目(2013FA022、2014HB042)

作者简介: 朱凯, 硕士研究生, 从事生态水文研究。E-mail: zhukai@xtbg.ac.cn

注: 刘文杰为通信作者。E-mail: lwj@xtbg.org.cn

土地利用变化是全球环境变化的主要组成部分和主要原因^[1], 关于土地利用的研究已成为当前国际上的研究热点之一^[2-4]。合理的土地利用方式可改善土壤结构, 增强土壤对外界环境变化的抵抗力^[5], 不合理的土地利用方式则会导致土壤质量下降^[6]。土壤理化性质反映了土壤环境的基本状况^[7], 能表征土壤的质量情况。

在不同的土地利用方式下, 植被覆盖与管理方式的差异是影响土壤理化特性的关键因素。研究显示, 不同的植被覆盖对西双版纳地区土壤质量的影响存在较大差异^[8]。20 世纪 50 年代西双版纳开始种植橡胶 *Hevea brasiliensis*^[9], 随着橡胶产业的发展, 西双版纳新开垦种植橡胶树的面积逐年递增, 截至 2014 年, 傣族自治州橡胶种植面积已达 37.67 万 hm^2 ^[10]。胶区单一的橡胶种植模式导致严重的水土流失^[11], 橡胶园内土壤营养元素、有机质、矿质元素含量均有不同程度的下降, 土壤营养物质的循环速率降低、有效性减弱, 土壤养分循环受到显著影响^[12]。为充分利用土地资源、减少水土流失和提高橡胶林的经济效益, 近年来中国科学院西双版纳植物园在该地区构建了胶农复合林。对该胶农复合系统的初步研究表明, 林内的光照和温湿度状况得到较大改善, 各植物的生长状况也较为良好^[8], 但对胶农复合林的土壤质量状况, 尤其是土壤理化性质的研究还不够深入。本文以中国科学院西双版纳热带植物园内的橡胶-大叶千斤拔、橡胶-可可、橡胶-茶叶、橡胶-龙血树 4 种较典型的胶农复合林为研究对象, 以单层橡胶林为对照样地, 研究胶农复合林取代植被类型单一的单层橡胶林后土壤理化性质的变化情况, 旨在为合理利用土地资源、构建生态友好胶园提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省最南端的西双版纳傣族自治州, 地理位置 $99^{\circ}56' \sim 101^{\circ}50'E$, $21^{\circ}08' \sim 22^{\circ}36'N$, 海拔约 580 m, 属热带北缘的西南季风气候, 一年中包括雾凉季(11 月~翌年 2 月)、干热季(3 月~4 月)以及雨季(5 月~10 月)等 3 个明显的季节^[13]。雾凉季降水较少, 但早晚有浓雾空气湿度大; 干热季时气候高温干燥; 雨季气候湿热多雨, 降雨量占全年降雨量的 87% 左右^[14]。年平均气温 21.5°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 7860°C , 平均最低气温 7.5°C , 年日照时数 1828 h, 年降水量 1557 mm, 年相对湿度 86%, 干燥度 1.01, 年径流量 764 mm。地带性土壤为由白垩纪砂岩发育而成的砖红壤^[15]。

以中国科学院西双版纳热带植物园内橡胶-可可 *Theobroma cacao*、橡胶-大叶千斤拔 *Flemingia macrophylla*、橡胶-龙血树 *Dracaena americana*、橡胶-云南大叶茶 *Camellia sinensis* 等胶农复合系统为研究样地, 以植被类型单一的单层橡胶林为对照样地, 比较不同类型的农(林)复合系统中土壤斥水特性。样地海拔高度差不足 30 m, 坡向为东北向 $29^{\circ} \sim 83^{\circ}$, 坡度为 $29^{\circ} \sim 33^{\circ}$, 环境大体一致。定期对胶农复合林进行施肥除草等管理, 施肥量一致, 并且无差异性割胶。

1.2 方 法

1.2.1 样品采集和处理 2016 年 3 月中旬(干热季), 在各样地选择代表性取样点, 按照随机采样的原则, 选取 5 个样点, 去除附着在样点表面的枯枝落叶等杂物, 使用便携式渗透计(Mini Disk Infiltrometer, Decagon Devices, USA)对样地进行土壤导水率测量; 在每个入渗仪周围(5 个入渗仪同时测量)用土钻采集 3 份表层 0~20 cm 土样, 其中一半土样(共 15 份)用于土壤含水量的测量, 另一半土样用四分法进行混合处理(共 5 份), 置于做好标记的自封袋中, 编号并带回实验室进行处理。去除土样中的植物残体、小石块以及蚯蚓等动物; 在每个入渗仪旁边用环刀取土, 用于土壤容重测量。

1.2.2 土壤样品分析 土壤含水量用烘干法进行测定, 土壤容重用环刀法测定, 土壤总孔隙度在容重的基础上用经验公式得出, 土壤电导率用电导法测定(Field Scout Direct Soil EC Meter, Spectrum Technologies, USA), 土壤 pH 用电位法测定(Pocket-sized waterproof pH meter, IQ Scientific Instruments, USA), 土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定^[16], 全氮用全自动凯氏定氮法测定^[17]。

1.2.3 土壤导水率测定 用便携式渗透计测量土壤导水率。用 Zhang^[18]的方法, 测量累积入渗量/时间, 采用下面的公式进行拟合:

$$I = C_1 t + C_2 \quad (1)$$

C_1 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和 C_2 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2}$)是参数。 C_1 与导水率有关, C_2 代表土壤的吸附能力。土壤导水率 K 按下面公式计算:

$$K = C_1/A \quad (2)$$

C_1 是累积入渗量/时间平方根曲线的斜率, 参数 A 与土壤类型有关, 将土壤水分运动特征曲线 van Genuchten 参数和虹吸速度、渗透计底盘半径联系起来。参见 Decagon Devices Mini Disk Infiltrometer 使用手册。

1.2.4 **数据处理** 采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行统计处理。运用 SPSS 20.0 软件进行 LSD 多重比较分析与主成分分析。图形采用 Origin 8.5 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同胶农复合林土壤理化性质比较

2.1.1 **容重、孔隙度** 从图1可以看出, 不同胶农复合林的土壤容重存在不同程度的差异, 其中单层橡胶林土壤容重为 $1.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 显著高于其余4种胶农复合林的土壤容重($P < 0.05$), 其次是橡胶-大叶千斤拔复合林、橡胶-茶叶复合林、橡胶-龙血树复合林, 橡胶-可可复合林的土壤容重最低, 为 $1.09 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 比单层橡胶林的土壤容重低 27.81%。

孔隙度影响土壤的通气状况, 还能反映土壤松紧度和结构状况好坏。不同胶农复合林土壤总孔隙度为 44.32%~58.12%。与土壤容重的变化趋势相反, 橡胶-可可复合林土壤总孔隙度最大, 单层橡胶林土壤总孔隙度最小, 其余三种胶农复合林土壤总孔隙度居中, 在 52.50%~54.54%之间(图1)。

2.1.2 **有机质、全氮含量** 土壤有机质是土壤中各种营养特别是氮、磷的重要来源。由于土壤有机质具有胶体特征, 能吸附较多的阳离子, 因而使土壤具有保肥力和缓冲性, 还能使土壤疏松并形成土壤团粒结构。对土壤有机质含量的分析有助于理解土壤的保水保土性能。从图2可看出, 不同胶农复合林土壤有机质与单层橡胶林之间存在显著差异($P < 0.05$)。橡胶-龙血树、橡胶-可可、橡胶-茶叶等复合林土壤有机质较高, 橡胶-大叶千斤拔复合林土壤有机质含量较低, 单层橡胶林的土壤有机质含量显著低于胶农复合林($P < 0.05$)。单因素方差分析表明, 各林型间平均全氮含量差异不显著($P > 0.05$)(图2)。

2.1.3 **水力特性** 土壤含水量是最常用的土壤物理性质指标之一, 直接影响土壤的固、液、气三相比以及土壤适耕性和作物的生长发育。从图3可见, 不同橡胶复合林土壤含水量具有显著差异($P < 0.05$), 橡胶-可可复合林的土壤含水量最高, 为 39.06%; 橡胶-龙血树复合林次之, 为 34.61%; 橡胶-茶叶复合林与橡胶-大叶千斤拔复合林含水量分别为 32.33%、30.49%; 单层橡胶林的土壤含水量为 25.38%, 显著低于其他4种胶农复合林($P < 0.05$)。

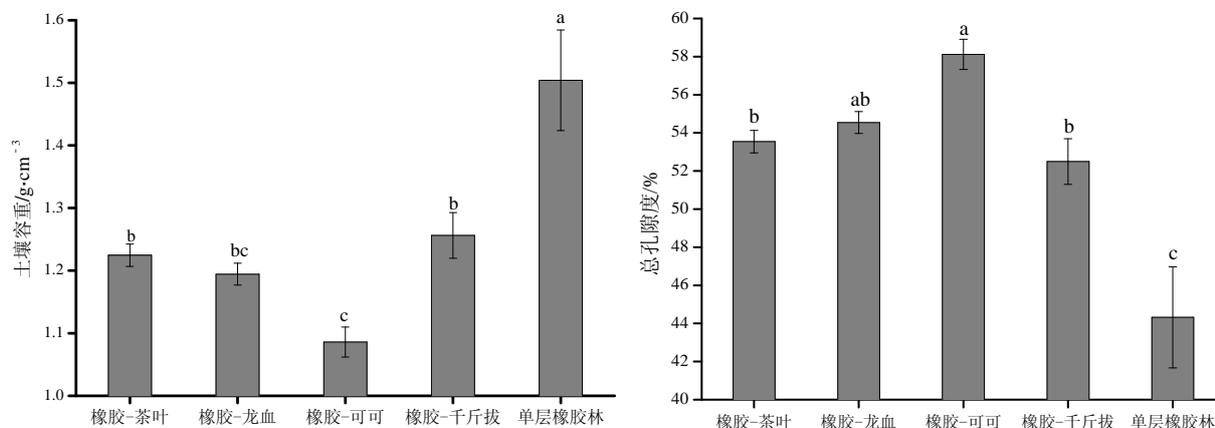


图1 不同土地利用方式土壤容重与土壤总孔隙度
Fig. 1 Soilbulk density and total soil porosity in different land use patterns

注: 不同英文字母表示差异显著($P < 0.05$), 图2~图4同。

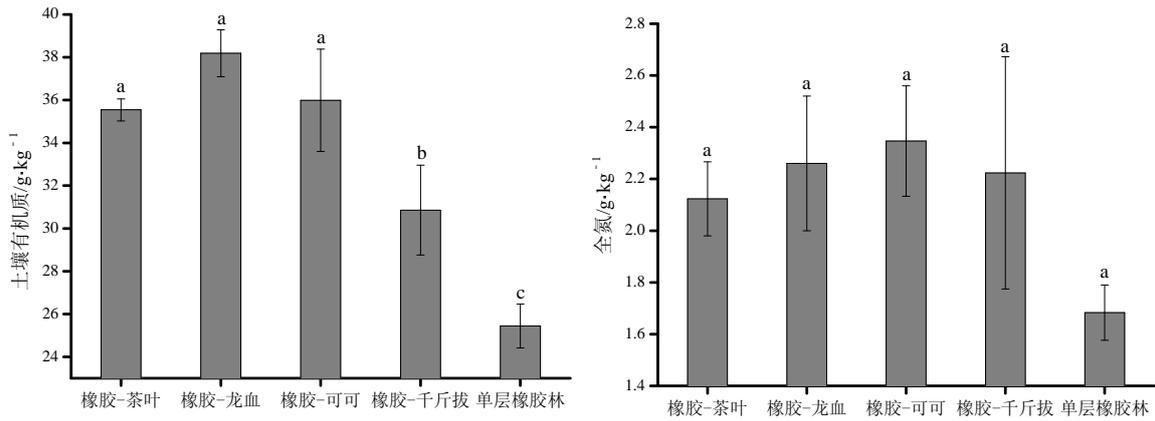


图 2 不同土地利用方式土壤有机质与全氮
Fig. 2 Soil organic matter and soil total nitrogen in different land use patterns

土壤导水率反映土壤的入渗和渗漏性能，是土壤重要的物理性质之一，直接影响到作物的生长发育。各胶农复合林的土壤导水率测定表明，橡胶-可可、橡胶-大叶千斤拔复合林的导水率较大，分别为 $5.05 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $4.30 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ；橡胶-龙血树、橡胶-茶叶复合林的导水率稍低，分别为 $3.34 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2.11 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ；单层橡胶林的最低，为 $1.14 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3)。

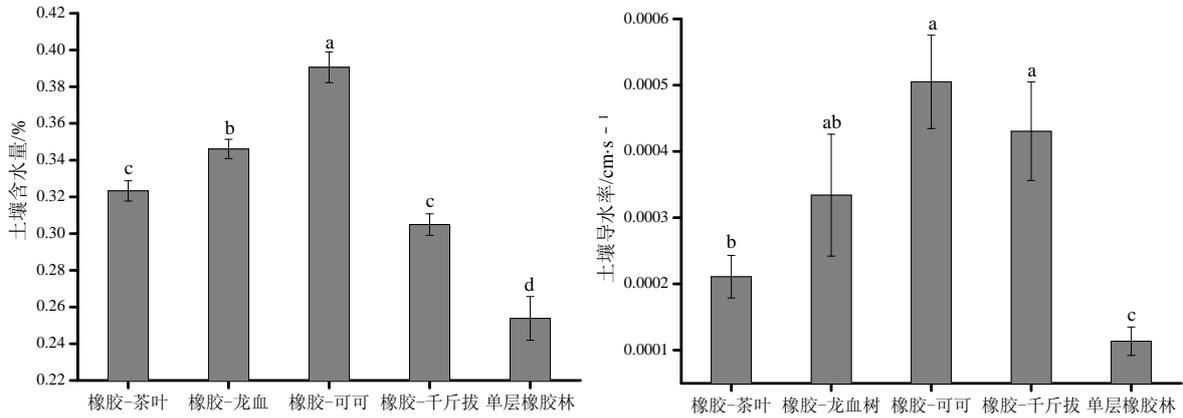


图 3 不同土地利用方式土壤含水量与导水率
Fig. 3 Soil water content and soil hydraulic conductivity in different land use patterns

2.1.4 pH 和电导率 西双版纳地区不同胶农复合林土壤 pH 与电导率的大小分布情况大体一致(图 4)，橡胶-龙血树复合林与橡胶-大叶千斤拔复合林的 pH 值与电导率较高，单层橡胶林与橡胶-茶叶复合林次之，橡胶-可可最低。

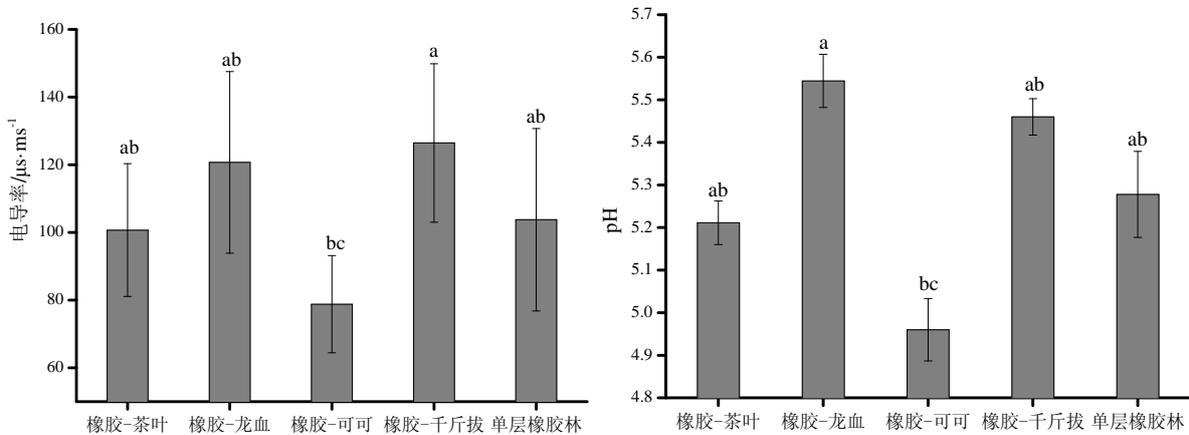


图 4 不同土地利用方式的土壤电导率与 pH
Fig. 4 Soil electrical conductivity and pH in different land use patterns

2.2 不同胶农复合林土壤综合评价

2.2.1 **主成分选取** 对土壤理化性质进行主成分分析, 得出前两个主成分的特征值均大于 1, 方差贡献率分别为 69.305%、23.300%, 累计贡献率达 92.605%(表 1), 说明前两个主成分能反映土壤理化性质 92.605%的信息。因此, 选择前两个主成分进行综合评价较为合理。

2.2.2 **主成分得分及综合得分** 利用 SPSS 20.0 软件计算出前 2 个主成分中各个指标对应的系数, 并与标准化数据相乘, 得到主成分表达式 F_1 和 F_2 ; 再根据每个主成分的特征值计算出主成分综合得分。模型 F 如下:

$$F_1 = 0.423X_1 - 0.422X_2 + 0.418X_3 + 0.403X_4 + 0.367X_5 + 0.351X_6 - 0.151X_7 - 0.160X_8$$

$$F_2 = 0.048X_1 - 0.051X_2 - 0.062X_3 + 0.215X_4 + 0.156X_5 + 0.139X_6 + 0.677X_7 + 0.666X_8$$

$$F = 0.748F_1 + 0.252F_2$$

根据主成分综合得分模型计算出综合主成分值, 对不同种植模式橡胶林的土壤理化性质进行综合评价(表 2)。5 种土地利用类型土壤特性综合得分最高的为橡胶-可可复合林, 橡胶-龙血树复合林次之, 再次为橡胶-茶叶复合林和橡胶-大叶千斤拔复合林, 综合得分最低的为植被类型单一的单层橡胶林。说明植被类型单一的单层橡胶林土壤理化性质最差, 将单层橡胶林改造为橡胶复合林后土壤质量能有较大改善。

表 1 方差分解主成分提取分析

Table 1 Principal component analysis by variance decomposition

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	5.544	69.305	69.305
2	1.864	23.300	92.605

表 2 综合主成分值

Table 2 Comprehensive value of principal

林型	F_1	F_2	F	排名
橡胶-茶叶	0.084	0.1774	0.047	3
橡胶-龙血树	0.4794	0.433	0.251	2
橡胶-可可	0.5194	0.756	0.579	1
橡胶-千斤拔	-0.0444	1.063	-0.011	4
单层橡胶林	-1.0304	-0.411	-0.091	5

3 讨论

地表植被不同的覆盖度对土壤肥力的影响是显著不同的^[8], 植被覆盖度越大, 表层土壤获取的光和热越少, 进而增加有机质的积累^[19]。自然条件下, 土壤有机质是土壤氮素的主要来源, 随着有机质的逐步矿化, 氮素逐渐释放出来, 土壤全氮含量提高^[20]。单层橡胶林较低的植被覆盖度, 使土壤暴露于大气之中, 加上严重的水土流失, 导致表层土壤养分流失严重, 因此其土壤有机质含量与全氮含量都远低于胶农复合林。胶农复合林相对单层橡胶林而言, 具有更丰富的植被类型, 土壤表层有较多现存枯枝落叶, 且有大量凋落物归还土壤^[21], 有利于土壤养分的积累。张森等^[22]对西双版纳橡胶-萝芙木-大叶千斤拔复合生态系统的生物量进行了研究, 认为在橡胶林下种植其他种类植物能显著提高生物量积累与土壤肥力, 该结论与本研究一致。因此, 构建胶农复合林取代单层橡胶林能改善土壤肥力。

土壤水分是植物生长和发育必要的环境因子之一^[23], 尤其是在干季成为植物生长的限制性因子。从西双版纳地区干热季不同胶农复合林的土壤含水量研究结果来看, 单层橡胶林土壤含水量显著低于 4 种胶农复合林的土壤含水量。这主要与植被的覆盖度及土壤表面枯落物的种类与数量有关^[24], 胶农复合林中植被类型多样, 植被群落层次结构好, 枯落物较多, 具有较好的涵养水源效果, 因此土壤含水量较高。而单层橡胶林植被类型单一, 植被覆盖度小, 枯落物极少, 土壤水分蒸发大, 土壤含水量低。

土壤容重与土壤孔隙度是土壤物理性质的综合反映。单层橡胶林的土壤容重显著高于其他胶农复合林, 而土壤孔隙度的分布情况刚好与之相反。出现这种差异的主要原因在于土壤根系及土壤生物不同导致的。单层橡胶林土壤中根系相对较少, 且主要是大根系, 土壤生物也较少; 而在胶农复合林中, 表层土壤(0~20 cm)的细根特别发达, 蚯蚓及白蚁等土壤生物数量较多, 对土壤具有明显的疏松作用, 使土壤容重下降、孔隙度增加。这与汪汇海等^[25]的结果相符。

土壤导水率反映了土壤的入渗和渗漏性质, 是研究水分、溶质在土壤中运动规律时的重要水力参数。研究表明, 单层橡胶林中的土壤导水率远低于胶农复合林土壤导水率, 说明了单层橡胶林的土壤水分入渗状况不如胶农复合林, 在同等降雨情况下, 单层橡胶林中的雨水无法及时下渗, 更容易产生径流, 增加土壤侵蚀风险。将单层橡胶改造为胶农复合林后, 土壤导水率增加, 下渗能力增强。由于土壤导水率与土壤容重、土壤孔隙等土壤物理性质密切相关, 并受土壤中根系与其附属的土壤生物影

响^[26], 良好的土壤物理特性及根系状况都有助于增加土壤水分入渗, 减少水土流失^[27]。因此, 将单层橡胶林改造为胶农复合林能减少土壤侵蚀, 保持水土。

采用单因素方差分析对单层橡胶林和胶农复合林的土壤理化性质进行多重比较, 并对各土地利用类型的土壤理化性质进行主成分综合评价, 得出西双版纳地区不同胶农复合林土壤理化特性优劣依次为: 橡胶-可可复合林>橡胶-龙血树复合林>橡胶-茶叶复合林>橡胶-大叶千斤拔复合林>单层橡胶林。说明植被类型单一的单层橡胶林土壤理化性质较差, 不利于土壤保水保肥; 而胶农复合林的土壤理化性质较好, 保水保肥性好。在西双版纳地区, 将单层橡胶林改造为胶农复合林能够提高土壤肥力、保持水土, 是较理想的生态农业模式, 应大力推广应用。

参考文献:

- [1] 张兰生,方修琦,任国玉. 全球变化[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [2] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域—土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996,11(6): 553—558.
- [3] 唐华俊,吴文斌,杨鹏,陈佑启,Verburg P H. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J]. 地理学报, 2009,64(4): 456—468.
- [4] 刘纪远,张增祥,徐新良,匡文慧,周万村,张树文,李仁东,颜长珍,于东升,吴世新,江南. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009,64(12): 1411—1420.
- [5] Fu B J, Chen L D, Ma K M, Zhou H F, Wang J. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shaanxi, China[J]. Catena, 2000,39(1): 69—78.
- [6] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,李延梅,黄志霖,黄奕龙,彭鸿嘉. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2004,15(12): 2292—2296.
- [7] 路鹏,彭佩钦,宋变兰,唐国勇,邹焱,黄道友,肖和艾,吴金水,苏以荣. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和 GIS 分析[J]. 中国农业科学, 2005,38(6): 1204—1212.
- [8] 冯耀宗. 人工群落[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2007.
- [9] Xu J, Grumbine R E, Beckschäfer P. Landscape transformation through the use of ecological and socioeconomic indicators in Xishuangbanna, Southwest China, Mekong Region[J]. Ecological Indicators, 2014,36: 749—756.
- [10] 廖湛娜,李鹏,封志明,张景华. 西双版纳橡胶林面积遥感监测和时空变化[J]. 农业工程学报, 2014,30(22): 170—180.
- [11] 张一平,张克映. 西双版纳热带地区不同植被覆盖地域径流特征[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997,3(4): 25—30.
- [12] 张佳琦,薛达元. 西双版纳橡胶林种植的生态环境影响研究[J]. 中国人口资源与环境, 2013(S2): 304—307.
- [13] Zhang K Y. An analysis on the characteristics and forming factors of climates in the south part of Yunnan[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1963,33: 210—230.
- [14] 刘文杰,李鹏菊,李红梅,段文平. 西双版纳热带季节雨林林下土壤蒸发的稳定性同位素分析[J]. 生态学报, 2006,26(5): 1303—1311.
- [15] 房秋兰,沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 2006,30(1): 97—103.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [17] LYT 1237-1999. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. 北京: 国家林业局, 1999.
- [18] Zhang R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997,61(4): 1024—1030.
- [19] 苏永中,赵哈林. 科尔沁沙地不同土地利用和管理方式对土壤质量性状的影响[J]. 应用生态学报, 2003,14(10): 1681—1686.
- [20] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 郭剑芬,陈光水,钱伟,杨少红,杨玉盛,郑群瑞. 万木林自然保护区 2 种天然林及杉木人工林凋落量及养分归还[J]. 生态学报, 2006,26(12): 4091—4098.
- [22] 张森,谢志英,陈蕾西,刘成刚,赵永祥,王秀华,刘长安,唐建维. 西双版纳橡胶-萝芙木-大叶千斤拔复合生态系统的生物量及年生长量[J]. 生态学杂志, 2016,35(7): 1704—1712.
- [23] 李孝广,余新晓,张振明,陈慧新. 黄土区土壤水分与植物耗水研究[J]. 水土保持研究, 2007,14(5): 304—306.
- [24] 张萍,曾信波. 植被蓄水保土功能研究[J]. 山地农业生物学报, 1999,18(5): 300—304.
- [25] 汪江海,李德厚. 胶茶人工群落在改善山地土壤生态环境上的作用[J]. 山地学报, 2003,21(3): 318—323.
- [26] 李建兴,何丙辉,徐小军. 生物埂护坡下不同土地利用方式对土壤渗透性的影响[J]. 水土保持学报, 2012,26(6): 243—248.
- [27] 中野秀章. 森林水文学(李云森译)[M]. 北京: 中国林业出版社, 1983.