

西双版纳地区胶农复合系统的土壤斥水特性^{*}

朱 凯^{1,2}, 刘文杰¹, 刘佳庆^{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: 采用滴水穿透时间法与斥水指数法, 测定了西双版纳地区橡胶-可可、橡胶-龙血树、橡胶-大叶千斤拔、橡胶-茶树 4 种较典型的胶农复合系统和单层橡胶林中的土壤斥水特性及其与土壤基本理化性质的关系。结果表明: 单层橡胶林的种植增加了土壤的斥水性, 其斥水持续时间显著增长, 斥水指数也比其他胶农复合系统显著增大; 不同土地利用方式对土壤的水力特性具有一定的影响, 除了橡胶-大叶千斤拔之外, 单层橡胶林中土壤的饱和导水率显著低于其他胶农复合林下的土壤饱和导水率($P < 0.05$)。相关分析表明, 土壤斥水指数与土壤饱和导水率呈显著负相关关系($P < 0.05, r = -0.556$); 逐步回归分析表明, 土壤容重与土壤质地是影响西双版纳地区胶农复合系统中土壤斥水性的主要因素。因此, 构建胶农复合生态系统能够有效减轻土壤斥水性, 增加土壤水分入渗, 进而减轻和控制水土流失。

关键词: 土壤斥水性; 农林复合系统; 斥水指数; 水土保持; 西双版纳

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-7971(2017)01-0137-10

土壤斥水性是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象^[1]。由于土壤斥水性的存在, 一些土壤比较干, 很容易形成风蚀, 并且斥水性会大大减少入渗形成优先流^[2], 从而导致土壤水分分布不均匀, 使水中携带的溶质更快地进入地下水, 降低土壤持水能力, 形成冲刷, 加速土壤侵蚀, 影响植被生长, 引起水土流失、土地退化^[3]。这些不利于农业发展, 还会造成严重的环境问题^[4]。世界许多地区都有斥水性土壤的存在, 大约 120 多年前美国就开始研究由于土壤存在斥水性而带来的问题。荷兰大概有四分之三的耕作土壤表层呈现中重度的斥水性^[5]。澳大利亚的土壤科学家早在 1959 年就发现了斥水性土壤的存在, 大片干旱的土地上种子无法发芽, 只在比较湿润的地方出苗, 导致了澳洲的西部和南部地区约 500 万 hm^2 的土地减产, 损失严重^[6]。20 世纪 90 年代新西兰也开始普查斥水性土壤, 并进行相应的改良研究^[7]。目前, 国外关于土壤斥水性研究较多, 大多数集中在美洲、澳洲、欧洲

的斯洛伐克、荷兰以及亚洲的以色列、伊朗等国家。我国对土壤斥水性的研究相对较晚, 20 世纪 90 年代, 杨邦杰在国内提出了土壤斥水性的问题^[8]; 随后吴延磊等对滴水穿透时间法与酒精溶液入渗法这 2 种常用方法测定土壤斥水性结果的相关性进行了研究^[9]; 杨昊天等对腾格里沙漠沙丘固定后土壤的斥水特征进行了研究^[10]; 刘发林等研究了森林火灾对马尾松次生林土壤斥水性的影响^[11]; 陈俊英等研究了土壤的斥水性和含水量变化关系的数学模型^[12]; 商艳玲等研究了再生水灌溉对土壤水盐运移及斥水性的影响^[13]。由于研究区域和研究成果相对国外而言比较匮乏, 存在部分研究空白。

近几十年以来由于橡胶产业的发展, 西双版纳新开垦种植橡胶树的面积逐年递增, 原生生境也因此遭到严重破坏^[14]。截至 2014 年, 全州橡胶种植面积已达 37.67 万 hm^2 ^[15], 胶区单一的种植橡胶模式导致了十分严重的水土流失^[16]。为了充分利用

^{*} 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(1991-), 男, 湖北人, 硕士生, 主要从事生态水文研究。E-mail: zhukai@xtbg.ac.cn。

通信作者: 刘文杰(1969-), 男, 河南人, 研究员, 博士生导师, 主要从事生态水文研究。E-mail: lwj@xtbg.org.cn。

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一些胶农复合林.对这些胶农复合系统的初步研究表明,其林内的光、温、湿状况得到了极大改善,各植物的生长状况也较为良好^[13].然而有关这些胶农复合系统水土保持方面的研究相对较少,尤其是有关土壤斥水性方面的研究比较匮乏.通过研究该区域胶农复合系统下土壤的斥水特性,探索影响土壤斥水性的因素以及斥水土壤的入渗特性,无论是从指导胶农复合系统的生产实践与水土保持工作,还是丰富我国土壤斥水性研究,都具有一定的意义.

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,地理位置为 $99^{\circ}56' \sim 101^{\circ}50' E$, $21^{\circ}08' \sim 22^{\circ}36' N$,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月份)、干热季(3月~4月)以及雨季(5月~10月)这3个明显的季节^[14].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^[15].年平均气温 $21.5^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 积温 $7\ 860^{\circ}C$,平均最低气温 $7.5^{\circ}C$,年日照时数 1 828 h,年降水量 1 557 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^[16].

本研究选取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,于此同时选取植被类型单一的单层橡胶林(*Hevea brasiliensis*)为对比研究样地,以便比较不同类型的农(林)复合系统中土壤斥水特性.实验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.胶农定期对胶农复合林进行管理,如施肥除草,施肥量一致,并且无差异性割胶.

1.2 研究方法

1.2.1 样品的采集和处理 2015年9月中旬(雨季),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,轻轻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, America)对样地进行土壤入渗以及斥水指数的原位测量;随机选取16个样点,轻轻去除附着在各样点表面的枯枝落叶等杂物,用滴水穿透时间法 WDPT(water drop penetration time)对样地进行土壤斥水持续时间的实际测定.斥水指数法实验结束后,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0~15 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.随后在每个入渗仪旁边用环刀取土,用于土壤容重的测量.

1.2.2 土壤样品的分析测定 土壤含水量用烘干法进行测定,土壤容重用环刀法测定,土壤电导率用电导法测定(Field Scout Direct Soil EC Meter, Spectrum Technologies, America),土壤 pH 用电位法测定(Pocket-sized waterproof pH meter, IQ Scientific Instruments, America),采用重铬酸钾氧化外加热法进行土壤有机质含量的测定^[17],采用吸管法测量土壤的机械组成^[18].

1.2.3 土壤斥水性的测定方法 测定土壤斥水性的方法有很多种^[19],如接触角测定法、滴水穿透时间法(WDPT)、酒精溶液入渗法(MED)、固气表面张力测定法和进水压力水头测定法等.每种测量方法都有其局限性,为了研究结果能够反应实际情况,综合比较各种方法的优劣,本研究对于斥水性的测定主要使用滴水穿透时间法(WDPT)^[4]与斥水指数法(RI)^[23].

采用滴水穿透时间法(WDPT),在实验样地随机选取16个测定位置点,在每个位置点用一个标准的胶头滴管将3滴水(每滴约0.05 mL)滴在不低于5 mm土壤表面的位置上,以避免过大的动能影响土壤和滴液的相互作用^[4],用秒表测定水滴完全渗入土壤所需要的时间.取水滴入渗时间的算术平均值作为每个样地位置点实际斥水性的最终结果.本文采用 Doeer^[23]的土壤湿润性分类标准,将土壤斥水性分为5个等级:0级,无斥水性(滴液入渗时间 <5 s);1级,轻度斥水性(5~60 s);2级,中度斥水性(60~600 s);3级,强度斥水性(600~3 600 s);4级,极度斥水性($>3\ 600$ s).

斥水指数 R ^[22,24-25]可以通过使用便携式渗透计测定95%的乙醇和水溶液的吸附能力得出.将储

水室内装满乙醇来测定乙醇的吸附能力,用自来水测定水分的吸附能力.在这2个过程中气泡室都充满自来水,选择合适的虹吸力.按照以下步骤来做:

- (1) 记录开始时的乙醇(或水溶液)的体积;
- (2) 在时间零点时,将渗透计安放在土壤表面,保证仪器与土表接触良好;
- (3) 随着乙醇(或水溶液)的逐渐渗入,按照一定的时间间隔记录乙醇(或水溶液)的体积.运用 Decagon 公司提供的电子表格程序计算出累积入渗量/时间的平方根的斜率 S_e ,即 95% 乙醇的吸附力(或 S_w ,即水溶液的吸附力):

$$I = S_e \sqrt{t} \text{ (或 } I = S_w \sqrt{t} \text{)}, \quad (1)$$

式中: I 为土壤的累积入渗量; t 为入渗时间.

- (4) 斥水性指数 $R = 1.95 \left(\frac{S_e}{S_w} \right)$. 当 $R > 1$ 时,土壤表现出斥水性, R 值越大表明该土壤斥水性越强^[24].

1.2.4 土壤导水率的测定 用便携式渗透计测量土壤饱和导水率.用 Zhang^[24] 提出的方法,测量累积入渗量/时间,采用下面的公式进行拟合.

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t}, \quad (2)$$

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

$$k = \frac{C_1}{A}, \quad (3)$$

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

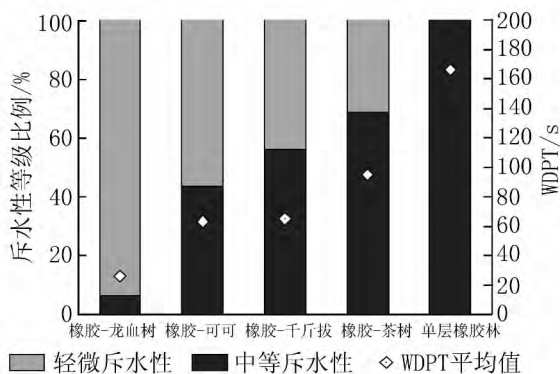


图1 不同植被类型土壤斥水性的相对频率

Fig.1 Relative frequency of water repellency of measured sites in different vegetation types

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.

1.2.5 数据处理与分析 采用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析.对不同胶农复合系统以及单层橡胶林中的土壤斥水指数、土壤有机质含量、pH、土壤电导率、土壤含水量、土壤容重以及土壤粒径进行单因素方差分析,并用 LSD 检验进行多重比较分析;以土壤斥水性为因变量,以土壤有机质含量、pH、土壤电导率、土壤有机质含量、土壤含水量、土壤容重以及土壤粒径为因变量,采用逐步回归分析了影响斥水性的主要因子;采用两变量相关分析法对土壤斥水性与土壤导水率进行相关分析.图形结果采用绘图软件 Origin8.5 绘制.

2 结果与分析

2.1 不同胶农复合系统的斥水特性 从图1与图2中可以看出,滴水穿透时间法(WDPT)与斥水指数法(RI)测量结果都表明单层橡胶林的土壤斥水特性显著大于所有胶农复合林的土壤斥水性.

虽然 WDPT 在一定程度上可以反映土壤的斥水特性,但其具有很大的变异性,因此对样点数据采用了 Doer^[23] 提出的斥水性分类标准进行了斥水强度的划分,并对各级斥水性样点数占总样点数的累积百分比进行了统计(图1).所有林型下的土壤都具有不同程度的土壤斥水性,其中橡胶-龙血树复合林中土壤斥水性最小,不到10%的样点出现中等斥水性,其余样点仅出现轻微斥水性;橡胶-可可复合林中有40%多的样点出现中等斥水性,

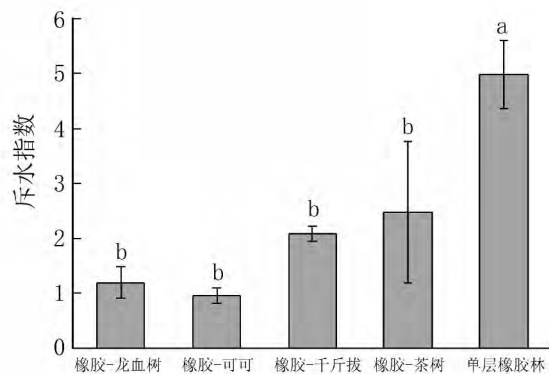


图2 不同植被类型土壤斥水指数(平均值±标准误)

Fig.2 The soil water repellency index (Mean ± SE) in different vegetation types

多于 50% 的样点出现轻微斥水性; 橡胶-大叶千斤拔与橡胶-茶树超过一半的样点出现中等斥水性, 当中相对比较强, 但仍然显著低于样点全部为中等斥水程度的单层橡胶林. 统计分析表明单层橡胶林斥水强度在所有胶农复合林中的土壤斥水性与所有胶农复合林的土壤斥水性具有显著差异 ($P < 0.05$), 橡胶-茶树、橡胶-大叶千斤拔与橡胶-可可复合林间的 WDPT 差异不显著 ($P > 0.05$), 橡胶-茶树、橡胶-大叶千斤拔复合林与橡胶-龙血树复合林之间差异显著 ($P < 0.05$), 而橡胶-可可复合林与橡胶-龙血树复合林存在林型间的 WDPT 差异显著 (表 1).

RI 测量结果显示 (图 2), 除了橡胶-可可复合林土壤是亲水的 ($R = 0.96$) 之外, 其他样地均具有不同程度的斥水性. 单层橡胶林的斥水性最强, 其斥水指数显著大于其他所有胶农复合林的斥水指数 ($P < 0.05$).

2.2 不同胶农复合系统的土壤入渗特性 不同胶农复合系统中土壤饱和导水率 (K) 和土壤水分入渗力 (S_w) 均表现为单层橡胶林 > 胶农复合系统 (表 1). 具体而言, 土壤饱和导水率 (K) 在不同复合系统中存在显著差异, 除橡胶-大叶千斤拔复合系统外 (与单层橡胶林的土壤饱和导水率差异不显著), 其他复合系统土壤饱和导水率均显著高于单层橡胶林的土壤饱和导水率 ($P < 0.05$); 橡胶-可可

与橡胶-茶树复合系统的土壤饱和导水率不存在显著差异. 土壤水分入渗力 (S_w) 在不同复合系统中存在显著差异, 与土壤导水率类似, 除橡胶-大叶千斤拔复合系统外, 其他复合系统土壤饱和导水率均显著高于单层橡胶林的土壤导水率 ($P < 0.05$); 橡胶-龙血与橡胶-茶树复合系统的土壤水分入渗力不存在显著差异.

Pearson 相关分析表明土壤斥水性 (R) 与土壤饱和导水率 (K) 之间存在显著负相关关系 ($r = -0.566, P = 0.28$; 图 3), 与土壤水分入渗力 (S_w) 存在极显著负相关关系 ($r = -0.723, P = 0.02$; 图 4). 这说明了构建胶农复合系统能够减轻土壤斥水性, 增加土壤水分入渗, 控制水土流失.

2.3 不同胶农复合系统土壤性质比较 不同胶农复合系统中土壤含水量从大到小依次为橡胶-可可 > 橡胶-茶树 > 橡胶-大叶千斤拔 > 橡胶-龙血树 > 单层橡胶林 (表 2). 方差分析表明土壤斥水指数 (R) 最小的橡胶-可可的含水量显著大于其他胶农复合林的土壤含水量 ($P < 0.05$), 斥水指数 (R) 最大且斥水持续时间 (WDPT) 最久的单层橡胶林的土壤含水量显著低于其他胶农复合林的土壤含水量 ($P < 0.05$). 这说明了构建胶农复合系统有利于增强土壤的保水蓄水能力. 但相关分析得出斥水性与含水量之间并没有显著的相关性 ($P > 0.05$).

土壤有机质含量在不同胶农复合系统中的分

表 1 不同土地利用类型土壤水力特性

Tab.1 The soil hydraulic properties in different vegetation types

土地利用类型	含水量 / %	$K / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$S_w / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1/2})$	R	WDPT / s
橡胶-可可	41.73a	$2.01 \times 10^{-4} \text{b}$	0.06b	0.96b (0.01 ~ 1.20)	63.89bc (12.61 ~ 288.22)
橡胶-龙血树	32.40a	$6.08 \times 10^{-4} \text{a}$	0.12a	1.20b (0.57 ~ 1.64)	26.38cd (4.88 ~ 83.79)
橡胶-大叶千斤拔	36.10b	$4.8 \times 10^{-5} \text{c}$	0.03c	2.09b (1.8 ~ 2.24)	65.21bc (3.71 ~ 196.29)
橡胶-茶树	36.55b	$2.27 \times 10^{-4} \text{b}$	0.10a	2.48b (0.65 ~ 5.06)	91.65b (34.6 ~ 148.19)
单层橡胶林	32.54c	$4.18 \times 10^{-5} \text{c}$	0.02c	4.98a (3.34 ~ 6.14)	166.54a (42.7 ~ 477.61)

同列数值后不同小写字母为差异显著 ($P < 0.05$). K 为土壤饱和导水率; S_w 为土壤的水分入渗力; R 为土壤斥水指数, 括号内为斥水指数数值范围; WDPT 为滴水穿透时间, 括号内为斥水持续时间数值范围

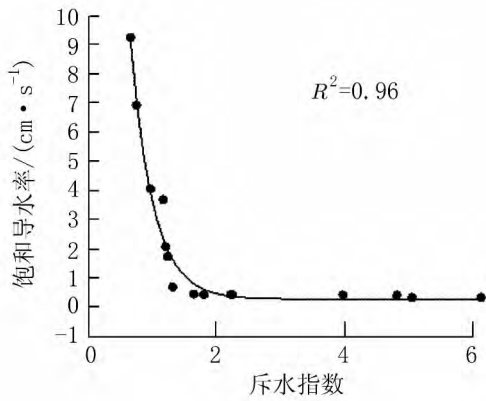


图 3 土壤饱和导水率与土壤斥水性的关系

Fig.3 The relationship of soil saturated hydraulic conductive and water repellency index

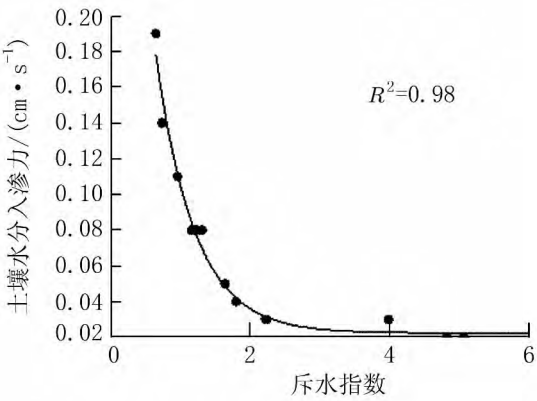


图 4 土壤水分入渗力与土壤斥水性的关系

Fig.4 The relationship of soil water sorptivity and water repellency index

表 2 不同土地利用类型下土壤理化性质对比

Tab.2 The soil chemical and physical properties in different vegetation gypes

土地利用类型	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量/ %	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH	电导率/ ($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%
橡胶-可可	1.08b	41.73a	29.51bc	4.90b	42.33a	30.10a	35.02ab	34.88b
橡胶-龙血树	1.09b	35.85b	32.41ab	5.68a	35.25ab	24.25a	38.41a	37.33b
橡胶-大叶千斤拔	1.14b	36.10b	32.14a	5.55a	40.25ab	24.54a	27.10cd	48.35a
橡胶-茶树	1.13b	36.55b	32.18ab	5.20b	36.75ab	31.38a	29.64bc	38.98b
单层橡胶林	1.21a	32.54c	26.27c	5.56a	33.00b	20.59a	29.90bc	49.51a

同列数值后不同小写字母为差异显著 ($P<0.05$)

布特征与土壤含水量的情况类似,单层橡胶林的有机质含量最低.除了橡胶-可可之外,单层橡胶林的土壤有机质含量显著低于其他胶农复合林中的土壤有机质含量 ($P<0.05$).说明了构建胶农复合系统能够明显改善土壤肥力,减缓土地退化,但相关分析得出斥水性与土壤有机质之间并没有显著的相关性 ($P>0.05$).

从表 2 可以看出,不同胶农复合系统的电导率从大到小为橡胶-可可>橡胶-大叶千斤拔>橡胶-茶>橡胶-龙血树>单层橡胶林.研究发现,电导率较大的橡胶-可可复合系统中土壤斥水性较小;电导率最小的单层橡胶林中,它们的斥水性最强.但相关分析得出斥水性与土壤电导率之间并没有显著的相关性 ($P>0.05$).

2.4 土壤斥水性与土壤容重 土壤容重是土壤重要的物理性质,土壤容重大小反映土壤结构、透气性、透水性能以及保水能力的高低.从表 2 可以看

出,各胶农复合系统的土壤容重从小到大依次为橡胶-可可>橡胶-龙血树>橡胶-茶树>橡胶-大叶千斤拔.各胶农复合系统之间的土壤容重差异不显著 ($P>0.05$),但单层橡胶林的土壤容重显著大于所有胶农复合系统 ($P<0.05$).回归分析表明(表 3),土壤斥水指数 (R) 与土壤容重具有极显著正相关关系 ($P<0.01, r=0.981$).说明构建胶农复合系统能够明显减缓土壤板结过程,有利于减轻土壤斥水性,增加土壤水分入渗,减少水土流失.

2.5 土壤斥水性与土壤质地 从表 2 可以看出土壤砂粒含量在各胶农复合系统中没有显著差异 ($P>0.05$);土壤粉粒含量在各胶农复合系统中具有显著差异 ($P<0.05$),在剔除橡胶-大叶千斤拔与橡胶-茶树复合系统样本之后,单层橡胶林土壤中粉粒含量比例显著小于其他胶农复合林中土壤的粉粒含量比例;土壤粘粒含量在各胶农复合系统中具有显著差异 ($P<0.05$),单层橡胶林中土壤粘粒含量

表 3 土壤斥水指数与土壤理化性质相关关系

Tab.3 The correlation of soil water repellency index and soil chemical and physical properties

项目	容重	含水量	有机质	pH	电导率	砂粒	粉粒	粘粒
<i>R</i>	0.981**	-0.796	-0.717	0.353	-0.695	-0.587	-0.549	0.771*
容重		-0.818*	-0.64	0.424	-0.624	-0.632	-0.661	0.878*
含水量			0.279	-0.822*	0.872	0.758	0.359	-0.755
有机质				0.077	0.331	0.467	0.126	-0.4
pH					-0.66	-0.813*	-0.053	0.581
电导率						0.594	-0.03	-0.377
砂粒							0.085	-0.728
粉粒								-0.744

* 表示差异显著($P < 0.05$), ** 表示差异极显著($P < 0.01$)

比例远大于其他胶农复合林中土壤粘粒含量的比例.回归分析表明,土壤斥水指数(R)与土壤砂粒含量及粉粒含量均没有显著相关性,而与土壤粘粒含量具有显著正相关关系($P < 0.05$, $r = 0.771$).

3 讨论

3.1 单层橡胶林与胶农复合林的土壤斥水性比较

野外原位实际斥水性体现了自然状态下水土之间相互作用最真实的特性^[2].本研究采用 2 种斥水性测量方法测定了 4 种不同的橡胶复合林以及单层橡胶林中土壤的原位实际斥水性.结果显示,植被类型单一的单层橡胶林的斥水持续时间比橡胶-龙血树复合林的斥水持续时间多了近 7 倍,比复合林中的斥水持续时间最长的也多了近 1 倍;单层橡胶林的土壤斥水指数比胶农复合林的也要高很多(单层橡胶林的斥水指数是橡胶-可可复合林斥水指数的 5.18 倍).造成这种现象的原因可能是由于实验时间刚好处于西双版纳地区的雨季,集中性的暴雨严重冲蚀着植被类型单一的单层橡胶林,导致单层橡胶林下的土壤形成表土结皮^[28],阻碍水分下渗,增强了土壤斥水性;而胶农复合林下土壤由于具有相对多样的植被类型的覆盖,相对与单层橡胶林来说,胶农复合系统林下层低矮的林冠通过拦截缓冲等作用使得雨滴终端速度降低而减小林下土壤溅蚀率^[29],土粒不至于分散而能长期保持土壤孔隙不会被堵塞,进而减小了土壤斥水性.另外,胶农复合林中的橡胶树与其底层低矮灌木以及其他草本植物构成植被丰富具有垂直结构森林系

统,多种植物的根系和土壤之间形成管状的粗大孔隙.由于植被类型丰富而带来的多种小动物、土壤微生物的活动能够缓解由于胶农长期践踏地表造成的土壤板结情况^[30],改善土壤结构,从而导致斥水性降低.

3.2 不同胶农复合系统土壤斥水性对土壤水分入渗的影响 土壤斥水性是土壤水分运动的关键影响因素之一,它的强弱直接影响土壤对水分吸收的难易程度,对土壤的水文过程,尤其是土壤的入渗产生很大影响^[31].研究发现胶农复合系统的土壤饱和导水率与水分入渗力均大于单层橡胶林,土壤饱和导水率与土壤水分入渗力最大的橡胶-龙血树复合林比单层橡胶林的土壤饱和导水率与土壤水分入渗力分别增加了 13.5 倍和 5 倍.这可能是由于土壤斥水性影响了土壤的下渗性能,而下渗性能主要取决于土层的孔隙性,植被类型丰富的林地很大程度上影响着土壤的孔隙性,林分状况更好的下渗性能比同样原土壤单一植被林地的下渗条件更为良好^[32].

本研究表明(图 3、4),土壤饱和导水率以及水分入渗力均分别与斥水指数具有显著负相关关系(相关系数分别为: $r = -0.566$, $P < 0.05$; $r = -0.723$, $P < 0.01$).说明了由于斥水性的存在会显著降低土壤的入渗速率,这与 Doerr 等^[33-34]和 Keizer 等^[35]研究结果一致.胶农复合系统的推广有利于减缓土壤斥水性,增加区域土壤入渗率,减少水土流失.

3.3 不同胶农复合系统土壤斥水性的主要影响因素 大量研究表明,土壤有机质含量是影响土壤斥

水性的主要因素之一,但是本研究表明土壤有机质并不是造成西双版纳地区胶农复合系统土壤斥水性的主要因素。表 2 中显示,胶农复合林中的土壤有机质含量都高于单层橡胶林的土壤有机质含量,在一定程度上说明了构建胶农复合系统取代植被类型单一的单层橡胶林有助于提高土壤肥力。回归分析得出有机质含量与土壤斥水性并没有显著的相关性(表 3),这与李金涛等^[64] 研究结果相符。推测西双版纳地区虽然土壤有机质为土壤斥水性提供了物质基础,但土壤质地与土壤容重更大程度上影响了土壤实际斥水性的强弱。

土壤容重是土壤重要的物理特性,容重小,表明土壤疏松多孔,结构性良好;反之,容重大,则表明土壤紧实板硬,缺乏团粒结构^[67]。相似质地的土壤,其水分入渗率会随容重的增大而减小,因为随土壤容重的增加,土壤团粒结构丧失、土壤孔隙减小、土壤变得紧密坚实,导致入渗能力降低^[68]。本研究发现,胶农复合系统中的土壤容重显著低于单层橡胶林中的土壤容重,而各橡胶复合林间的土壤容重却没有显著差异(表 2)。回归分析表明土壤容重与土壤斥水性极显著正相关(表 3)。说明了构建胶农复合系统能够明显改善土壤结构,增加土壤孔隙,增加土壤的通气透水性,减轻土壤斥水性,有利于保土保肥。

研究结果显示,胶农复合系统中土壤粘粒含量明显低于单层橡胶林;土壤斥水性与砂粒含量及粉粒含量都没有显著的相关关系,但与粘粒含量具有显著正相关关系(表 3)。说明了土壤质地是影响西双版纳地区土壤斥水性的主要因素之一,土壤粒级越小土壤斥水性就越强,这与秦纪洪等^[69]、Chan 等^[64] 以及 Doerr 等^[41] 得出的研究结果一致。因此推测虽然有机质为西双版纳地区土壤斥水性的产生提供了物质基础,并且与其他因素一起参与其中对斥水性产生了一些影响,但土壤质地更大程度上影响土壤斥水性强弱。探究其原因,土壤质地的差异实际上来源于土地利用方式的差异^[44]。因此,构建胶农复合系统可以改良土壤质地,减轻土壤斥水性,有利于水土保持。

4 结 论

本文采用滴水穿透时间法和斥水指数法测定了西双版纳地区不同胶农复合系统的土壤斥水性特征。初步结果表明:不同土地利用方式对土壤的

斥水性存在显著影响,不同胶农复合系统都具有不同程度的斥水性,但还未达到严重斥水性的程度;从保持水土方面来讲,构建橡胶-可可与橡胶-龙血树复合系统取代单层橡胶林不仅能够保证经济效益还能带来环境效益,符合新型农业的发展趋势;土壤斥水性的存在给土壤的水分入渗造成了很大的影响,使土壤在雨季入渗量减小,并在局部形成优先流,较强的斥水性往往对应着更强烈的土壤侵蚀;影响西双版纳地区胶农复合系统中土壤斥水性的主要因素为土壤容重与土壤质地。

参考文献:

- [1] BRANDT G H. Water movement in hydrophobic soils [J] //DEBANO L F, JOHN L. Proceedings of Symposium on Water Repellent Soils. Riverside, University of California, 1969: 91-115.
- [2] BAUTERS T W J, DICARLO D A, STEENHUIS T S, et al. Soil water content dependent wetting front characteristics in sands [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231: 244-254.
- [3] KEIZER J J, COELHO C O A, SHAKESBY R A, et al. The role of soil water repellency in overland flow generation in pine and eucalypt forest stands in coastal Portugal [J]. Soil Research, 2005, 43(3): 337-349.
- [4] DEKKER L W, JUNGERIUS P D. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands [J] //Dunes of European Coasts: Geomorphology-Hydrology-Soil Catena, Supplement 18, 1990: 173-183.
- [5] WETHERBY A M, PRUTTING C A. Profiles of communicative and cognitive-social abilities in autistic children [J]. Journal of Speech Language and Hearing Research, 1984, 27(3): 364-377.
- [6] WALLIS M G, HORNE D J, MCAULIFFE K W. A study of water repellency and its amelioration in a yellow-brown sand: 1. Severity of water repellency and the effects of wetting and abrasion [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1990, 33(1): 139-144.
- [7] 吴延磊, 李子忠, 龚元石. 两种常用方法测定土壤斥水性结果的相关性研究 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 8-13.
- [8] WU Y L, LI Z Z, GONG Y S. Correlation of soil water repellency measurements from two typical methods [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 8-13.
- [9] 杨昊天, 刘立超, 高艳红, 等. 腾格里沙漠沙丘固定后土壤的斥水性特征研究 [J]. 中国沙漠, 2012, 32(3):

- 674-682.
- YANG H T, LIU L C, GAO Y H, et al. Characteristics of soil water repellency in stabilized sand dunes in the tengger desert [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32 (3): 674-682
- [1] 刘发林, 张思玉. 森林火灾对马尾松次生林土壤斥水性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报: 自然科学版, 2009, 29(4): 37-41.
- LIU F L, ZHANG S Y. Influences of fire disturbance on the water repellency of *Pinus massoniana* soil [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 37-41.
- [10] 陈俊英, 张智韬, 杨飞, 等. 土壤的斥水性和含水量变化关系的数学模型 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 35-38.
- CHEN J Y, ZHANG Z T, YANG F, et al. Modeling water repellency and water content of a sand soil [J]. Journal of Irrigation & Drainage, 2009, 28(6): 35-38.
- [11] 商艳玲, 李毅, 朱德兰. 再生水灌溉对土壤斥水性的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 89-97.
- SHANG Y L, LI Y, ZHU D L. Effects of reclaimed water irrigation on soil water repellency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 89-97.
- [12] LI H, MA Y, AIDE T M, et al. Past present and future land-use in Xishuangbanna, China and the implications for carbon dynamics [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1): 16-24.
- [13] 廖湛姘, 李鹏, 封志明, 等. 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.
- LIAO C H, LI P, FENG Z M, et al. Area monitoring by remote sensing and spatiotemporal variation of rubber plantations in Xishuangbanna [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 170-180.
- [14] 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.
- ZHANG Y P, ZHANG K Y. Runoff characteristics of different vegetation covers in tropical region of Xishuangbanna [J]. Journal of Soil Water Conservation, 1997, 3(4): 25-30.
- [15] 冯耀宗. 人工群落: Man-made community [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2007.
- FENG Y Z. Artificial communities: Man-made community [M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Press, 2007.
- [16] 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.
- [17] 刘文杰, 李鹏菊, 李红梅, 等. 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.
- LIU W J, LI J P, LI H M. Estimation of evaporation rate from soil surface using stable isotopic composition of throughfall and stream water in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1303-1311.
- [18] 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.
- FANG Q L, SHA L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna [J]. Journal Plant Ecology, 2006, 30(1): 97-103.
- [19] 张万儒, 杨光滢, 屠南星, 等. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算 [M] // 森林土壤测定标准. 北京: 中国标准出版社, 1999: 105-108.
- ZHANG W R, YANG G Y, TU N X, et al. Determination of organic matter in forest soil and calculation carbon-nitrogen ratio [M] // Standards of forest soil measurement. Beijing: China Standard Press, 1999: 105-108.
- [20] 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.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analysis [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978.
- [21] DEBANO L F. Water repellency in soils: a historical overview [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231-232(1-4): 4-32.
- [22] TILLMAN R W, SCOTTER D R, WALLIS M G, et al. Water repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity [J]. Soil Research, 1989, 27(4): 637-644.
- [23] DOERR S H. On standardizing the 'water drop penetration time' and the 'molarity of an ethanol droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(7): 663-668.
- [24] HALLETT P D, YOUNG I M. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity [J]. European Journal of Soil Science, 1999, 50(1): 35-40.
- [25] LICHNER L, HALLETT P D, FEENEY D S, et al. Field measurement of soil water repellency and its impact on

- water flow under different vegetation [J]. *Biologia*, 2007, 62(5): 537-541.
- [26] ZHANG R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(4): 1 024-1 030.
- [27] DEKKER L W, RITSEMA C J. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231-232(1-4): 148-164.
- [28] 程琴娟, 蔡强国, 李家永. 表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2005, 24(4): 114-122.
- CHENG Q J, CAI Q G, LI J Y. Summarization on study of soil surface crust or sealing and its effects on erosion [J]. *Progress in Geography*, 2005, 24(4): 114-122.
- [29] 朱春景, 刘文杰, 吴骏恩. 西双版纳地区橡胶复合林雨滴动能及降雨侵蚀力 [J]. *土壤通报*, 2014, 45(5): 1 218-1 224.
- ZHU C J, LIU W J, WU J E. Rain runoff and soil erosion in shaded coffee agroforestry systems [J]. *Agrociencia*, 2014, 45(5): 1 218-1 224.
- [30] 王任智, 李一鲲. 从橡胶林土壤水分平衡看植胶对生态平衡的影响 [J]. *云南热作科技*, 1981, 3: 001.
- WANG R Z, LI Y K. The soil water balance of rubbers how to impact the ecological balance [J]. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 1981, 3: 001.
- [31] BUCZKO U, BENS O, DURNER W. Spatial and temporal variability of water repellency in a sandy soil contaminated with tar oil and heavy metals [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, 88(3): 249-268.
- [32] 中野秀章. 森林水文学 [M]. 李云森, 译. 北京: 中国林业出版社, 1983.
- [33] DOERR S H, MOODY J A. Hydrological effects of soil water repellency: on spatial and temporal uncertainties [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(4): 829-832.
- [34] DOERR S H, FERREIRA A J D, WALSH R P D, et al. Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: experimental evidence at point to catchment scales from Portugal [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(2): 363-377.
- [35] KEIZER J J, COELHO C O A, SHAKESBY R A, et al. The role of soil water repellency in overland flow generation in pine and eucalypt forest stands in coastal Portugal [J]. *Soil Research*, 2005, 43(3): 337-349.
- [36] 李金涛, 刘文杰, 卢洪健. 西双版纳热带雨林和橡胶林土壤斥水性比较 [J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2010, 32(S1): 391-398.
- LI J T, LIU W J, LU H J. Comparison of water repellency in the tropical rainforest and rubber plantation in Xishuangbanna [J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2010, 32(S1): 391-398.
- [37] 王辉, 王全九, 邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 10-18.
- WANG H, WANG Q J, SHAO M A. Effect of soil bulk density on soil nutrient in runoff from loess slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 10-18.
- [38] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 40-45.
- LI Z, WU P T, FENG H, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6): 40-45.
- [39] 秦纪洪, 赵利坤, 孙辉, 等. 岷江上游干旱河谷旱地土壤斥水性特征初步研究 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 259-262.
- QIN J H, ZHAO L K, SUN H, et al. Preliminary study on the characteristics of soil repellency in the dry valley of Minjiang river [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 259-262.
- [40] CHAN K Y. Development of seasonal water repellence under direct drilling [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(1): 326-329.
- [41] DOERR S H, SHAKESBY R A, WALSH R P D. Soil hydrophobicity variations with depth and particle size fraction in burned and unburned Eucalyptus globulus and Pinus pinaster forest terrain in the Aguada Basin, Portugal [J]. *Catena*, 1996, 27(1): 25-47.
- [42] 孙棋棋, 刘前进, 于兴修, 等. 沂蒙山区桃园和玉米地棕壤斥水性空间分布及影响因素 [J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(6): 80-87.
- SUN Q Q, LIU Q J, YU X X, et al. Spatial distribution and influencing factors of brown soil water repellency between peach orchard and corn field in Yimeng mountainous area [J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Sciences Edition*, 2013, 41(6): 80-87.

Water repellency of soil in different types of rubber-based agroforestry ecosystems in Xishuangbanna

ZHU Kai^{1,2}, LIU Wen-jie¹, LIU Jia-qing^{1,2}

(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: Water drop penetration time and water repellency index used to determine the soil water repellency and soil physicochemical properties were tested in four rubber-based (*Hevea brasiliensis*) agroforestry ecosystems with different interplants (*Camellia sinensis* , *Theobroma cacao* , *Flemingia macrophylla* , and *Dracaena americana*) and rubber monoculture in Xishuangbanna, Southwest China. The relationship between soil properties and soil water repellency was determined by Pearson correlation analysis and stepwise regression analysis. The results showed that both the persistent of soil water repellency time and the index of soil water repellency in rubber monoculture were significantly higher than agroforestry ecosystem. Different land use patterns have certain influence on the hydraulic characteristics of the soil, except *Flemingia macrophylla* , the soil saturated hydraulic conductivity in rubber monoculture was significantly lower than that in rubber-based agroforestry ecosystems ($P < 0.05$). Pearson correlation analysis showed that there was a significant negative relation between soil water repellency and soil saturated hydraulic conductivity ($P < 0.05$, $r = -0.556$). Stepwise regression analysis showed that the soil bulk density and soil texture were the most significant factors in controlling soil water repellency in the rubber-based agroforestry ecosystems. The results indicated that conversion rubber monoculture to rubber-based agroforestry ecosystem can effectively reduce soil water repellency and increase soil water infiltration, and ultimately control soil erosion.

Key words: soil water repellency; agroforestry ecosystems; water repellency index; soil and water conservation; Xishuangbanna