

## 桉树-甘蔗复合经营土壤物理性状研究

袁野<sup>1</sup>, 刘宁<sup>1</sup>, 余雪标<sup>2\*</sup> (1.东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2.海南大学林学院, 海南海口 570228)

**摘要** 针对桉树-甘蔗复合经营系统不同采样位置(距离林带 1.5、3.0、4.5、6.0 m 处)的土壤物理性质进行比较研究, 结果表明桉树-甘蔗复合经营后, 由于人为(耕作施肥等)的正向干预, 土壤表层养分集中, 间作带土壤(距离林带 3.0、4.5、6.0 m 处)物理性状得到了有效改良。研究的主要结论: 间作带表层土的土壤容重降低明显, 同层相比, 0~20 cm 土层土壤容重的排列顺序均为距离林带 6.0 m < 距离林带 4.5 m < 距离林带 3.0 m < 林带 < 距离林带 1.5 m, 说明间作对土壤容重的降低作用随距离呈正相关。桉树-甘蔗复合经营改善了土壤持水状况, 提高了空白间隔(距离林带 1.5 m 处)的持水能力。桉树-甘蔗复合经营系统下, 土壤容重与总孔隙度和毛管孔隙度呈负相关, 从土层的角度分析, 饱和持水量与土层呈显著负相关。桉树-甘蔗复合经营对土壤物理性状的改善主要集中在表层。

**关键词** 桉树; 甘蔗; 林农复合经营; 土壤物理性质

**中图分类号** S714.2 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2020)16-0119-04

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.16.032



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Study on Soil Physical Properties of Eucalyptus-sugarcane Composite Systems

YUAN Ye<sup>1</sup>, LIU Ning<sup>1</sup>, YU Xue-biao<sup>2</sup> (1. Forestry College of Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040; 2. Forestry College of Hainan University, Haikou, Hainan 570228)

**Abstract** The soil physical properties of eucalyptus-sugarcane composite system at different sampling positions (1.5, 3.0, 4.5, 6.0 m away from the forest belt) were compared. The results showed that after the eucalyptus-sugarcane complex management, the physical properties of the soil in the intercropping zone (3.0, 4.5, 6.0 m away from the forest belt) were effectively improved due to the positive intervention of man-made (cultivation and fertilization, etc.). The main conclusions of the study were as follows: soil bulk density of topsoil in intercropping zone decreased significantly, compared with the same layer, the order of soil bulk density in the 0-20 cm soil layer was 6.0 m away from the forest belt < 4.5 m away from the forest belt < 3.0 m away from the forest belt < forest belt < 1.5 m away from the forest belt. The results showed that the effect of intercropping on soil bulk density was positively correlated with the distance. Eucalyptus-sugarcane compound management improved the soil water holding capacity, and increased the water holding capacity of the blank space (1.5 m away from the forest belt). Soil bulk density was negatively correlated with total porosity and capillary porosity under eucalyptus-sugarcane compound management system. From the perspective of the soil layer, the saturated water holding capacity was significantly negatively correlated with the soil layer. Therefore, the improvement of the physical properties of the soil by the eucalyptus-sugarcane compound management was mainly concentrated on the surface.

**Key words** Eucalyptus; Sugarcane; Agroforestry compound management; Soil physical property

桉树是我国华南地区主要种植的用材林树种, 但由多代连栽和掠夺性的经营管理方式等引起的生态问题也非常突出<sup>[1-3]</sup>。由于华南地区桉树人工林一直以来的连栽经营方式, 使得桉树人工林的土壤理化性状不断恶化, 土壤地力不断下降, 直接导致桉树人工林生产力下降<sup>[4-6]</sup>。恢复林地生态环境和长期维持桉树人工林的生产力, 早已成为桉树研究的重要课题<sup>[7]</sup>。农林复合经营以其特有的优势被广泛关注和探索, 桉-农复合经营模式也随之产生<sup>[8-9]</sup>。大量研究表明, 在桉树林下间(轮)作绿肥、牧草、农作物等能有效改良土壤的理化性状<sup>[10-13]</sup>。该文通过对桉树-甘蔗大宽行复合经营系统不同取样位置的土壤物理性质进行研究, 旨在探讨桉树-甘蔗复合经营对土壤性状的改良效果, 以期桉树林农复合经营提供理论依据和技术支持。

## 1 试验地概况与研究方法

**1.1 试验地概况** 试验地地处热带北缘, 雷州半岛中北部的雷州林业局北坡林场, 地理位置为 111°31'E、21°31'N, 平均海拔 85 m, 地势平坦, 坡度为 2°。土壤为浅海沉积物砖红壤, 土层深厚。属于海洋性季风气候, 年均气温 23.5 °C, 最热月(7月)平均气温 28.9 °C, 最冷月(1月)平均气温 15.2 °C, 日

照时数 1 864 ~ 2 160 h。该地区年平均降雨量在 1 600 ~ 1 700 mm, 但时空分布不均, 暴雨居多。每年 5 月雨季开始, 降雨以 8—9 月最多, 月降雨量可达 400 mm 以上, 11 月逐渐转旱, 以 12 月至翌年 3—4 月降雨最少, 月平均降雨量不超过 50 mm, 视为旱季。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 试验地设计。** 在 3 年生宽窄行种植模式的桉树林内按一定株行距间作甘蔗。桉树造林种植模式见图 1, 窄行宽 1.3 m, 株距有 0.5、1.0、1.5 m 这 3 种规格; 宽行共有 8、10、12、14、16 m 这 5 种规格, 甘蔗间作于 12、14、16 m 宽行内。

**1.2.2 样品采集及实验室分析。** 为避免土壤本底的不一致性, 了解间作系统不同位置(间作和非间作区)土壤各指标的差异性, 在 12 m 宽行内选择条件一致的地段采集土壤样本。样品采集在甘蔗收获前, 结合树木调查一起进行, 主要测定每种种植模式下桉树树高、胸径、枝下高, 其中 12 m 带距桉树平均树高、胸径、枝下高见表 1。样点(图 1)自东向西依次在窄行桉树林带中心处、距离林带 1.5、3.0、4.5、6.0 m 处(分别简称林带、距离林带 1.5 m、距离林带 3.0 m、距离林带 4.5 m、距离林带 6.0 m)挖取土壤剖面, 重复 3 次, 每剖面分 0~20、>20~40 和 >40~60 cm 三层采取原状土, 每一土层取 3 个重复样品。土壤含水量测定采用烘干法, 土壤容重和土壤孔隙状况采用环刀法测定<sup>[14]</sup>。

**基金项目** 东北林业大学国家级大学生创新项目(201910225094)。

**作者简介** 袁野(1999—), 男, 山东莒县人, 从事森林土壤学研究。\* 通信作者, 研究员, 博士, 从事混合农林业及人工林培育研究。

**收稿日期** 2020-02-17

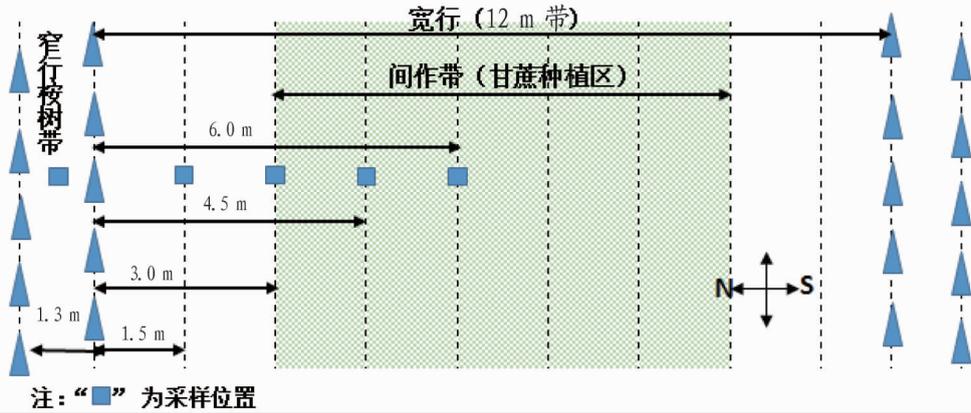


图1 桉树-甘蔗复合经营模式及样点布置

Fig.1 Eucalyptus-sugarcane compound management model and sample layout

表1 12 m带距桉树生长情况

Table 1 Growth of eucalyptus with 12 m band spacing

行株距 Planting distance	树高 Tree height m	胸径 Diameter at breast height//cm	枝下高 Height under branch//m
1.3 m×0.5 m	8.8	6.7	6.7
1.3 m×1.0 m	10.7	9.1	8.6
1.3 m×1.5 m	11.4	10.6	8.9

**1.2.3 数据处理。**利用 Excel 记录原始数据,用 SPSS 22.0 处理数据;显著性分析采用单因素 ANOVA 中的 LSD 方法进行多重比较,用双变量 Pearson 方法完成相关性分析,图表采用 Excel 制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同取样位置土壤物理性状比较

**2.1.1 土壤容重。**土壤容重是说明土壤坚实度的一个重要参数,反映土壤透水性、透气性和根系生长时的阻力状况<sup>[15]</sup>。由表 2 可知,不同取样位置土壤容重随土层深度增加基本呈现先增加后减小的规律。即 0~20 cm 土层低于>20~40 cm 土层,>20~40 cm 土层略高或不高于>40~60 cm 土层;各取样位置的土壤容重最大值均出现在>20~40 cm 土层。间作带(距离林带 3.0、4.5、6.0 m)表层(0~20 cm)土壤容重最小,>20~40 cm 与>40~60 cm 土层的变化幅度减小;表层土壤与另外两层土壤均变化显著( $P<0.05$ );距离林带 1.5 m 处和林带土壤容重垂直变化幅度相对较小;土层间无显著差异( $P>0.05$ )。从与林带距离上看,任一土层在距林带 1.5 m 处和间作带(距离林带 3.0、4.5、6.0 m)的土壤容重均有显著差异。

同层相比,0~20 cm 土层土壤容重从低到高的排列顺序均为距离林带 6.0 m<距林带 4.5 m<距离林带 3.0 m<林带<距林带 1.5 m,其中,前者较林带分别降低 4.3%、4.3%、4.1%、0.6%,>40~60 cm 土层的土壤容重彼此差异较小,从剖面土壤容重的平均值来看,距林带 1.5 m<距林带 6.0 m<林带<距林带 4.5 m<距林带 3.0 m,前者较林带分别降低 1.8%、1.7%、1.7%、0.9%。从分析结果可以看出,间作带土壤容重的降低主要体现在 0~20 cm 土层,>20~60 cm 土层土壤仍很紧实,

这是因为甘蔗根群的分布大多集中于 0~40 cm 土层,尤以 0~20 cm 表土层最多,由于根系生长、穿插对表层土壤起到了疏松作用,土壤容重降低;再者,每轮更新时机耕后表土疏松,20 cm 土层以下则有一定的压实,使土壤黏粒下移沉淀;同时,由于耕作深度较浅,犁底层上移,所以相对休闲空白间隔(距离林带 1.5 m),间作区土壤容重均值并没有显著下降。

**2.1.2 土壤孔隙度。**土壤孔隙状况也是表征土壤物理性质的重要指标之一,对土壤肥力有多方面的影响,它直接影响土壤的通气、透水和林木根系在土壤中的伸展和分布<sup>[16-17]</sup>。由表 2 看出,土壤毛管孔隙度、总孔隙度和非毛管孔隙度均随土层变化,垂直分布特征在 0~20、>20~40 土层间明显。间作带(距离林带 3.0、4.5、6.0 m)的非毛管孔隙度表现为 0~20 cm 与>20~40 cm 土层的下降幅度较大,>20~40 cm 与>40~60 cm 土层的下降幅度减小或有所增加,林带和距离林带 1.5 m 则表现为 0~20 cm 与>20~40 cm 土层的下降幅度较小,>20~40 cm 与>40~60 cm 土层的下降或增加幅度较大;如距离林带 3.0 m 表层(0~20 cm)比中层(>20~40 cm)高 0.32 百分点,林带则表现为表层比中层高 0.14 百分点,说明间作带 0~20 cm 土层的通气性较好,从>20~40 cm 土层已开始变得紧实,通透性变差,这与土壤容重的垂直变化相似。

不同位置土壤总孔隙度同层变化互有高低,只有距林带 4.5 m 处达到显著水平( $P<0.05$ )。各层总孔隙度平均表现为距离林带 3.0 m>距离林带 1.5 m>距离林带 6.0 m>距离林带 4.5 m>林带,前者依次比林带高 3.3%、3.0%、2.1%、1.6%;同层之间的毛管孔隙度相差也不大,各土层的平均排序为距离林带 1.5 m>距离林带 4.5 m>距离林带 6.0 m>林带>距离林带 3.0 m,前者较林带分别提高 2.2%、1.0%、0.6%,距林带 3.0 m 处比林带降低 0.4%。非毛管孔隙度平均表现为距离林带 6.0 m>距离林带 3.0 m>距离林带 4.5 m>林带>距离林带 1.5 m,距离林带 6.0、4.5、3.0 m 分别较林带提高 16.6%、16.2%、16.4%,距离林带 1.5 m 比林带降低了 2.2%。由测试结果可以看出,间作经营后间作带土壤总孔隙度升高,大孔隙增多,土壤通透性增加,土壤变得疏松,而林带土壤很紧实,通气性能相对较差,这将对桉树根系的生长和分布产生影响,根系对水分和养分的吸收受阻。

表 2 桉树-甘蔗复合系统不同取样位置土壤孔隙度、容重变化特征

Table 2 Variation characteristics of soil porosity and bulk density at different sampling locations of eucalyptus-sugarcane composite system

与林带距离 Distance from forest belt//m	土壤容重 Soil bulk density//g/cm <sup>3</sup>			总孔隙度 Total porosity//%		
	0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm	0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm
0	1.43±0.16 abA	1.49±0.04 abA	1.45±0.04 abA	41.22±5.42 aA	41.09±3.15 aA	40.93±0.68 abA
1.5	1.47±0.09 aA	1.46±0.04 bA	1.40±0.08 bA	41.11±3.51 aA	42.67±2.45 aA	42.64±3.61 aA
3.0	1.38±0.06 bB	1.50±0.09 abA	1.50±0.07 aA	44.60±8.16 aA	39.87±3.28 aA	42.16±3.05 abA
4.5	1.35±0.07 bB	1.56±0.07 aA	1.48±0.03 aA	43.22±2.15 aA	40.68±1.37 aB	40.42±0.61 bB
6.0	1.41±0.10 abB	1.52±0.09 abA	1.45±0.05 abA	41.66±1.81 aA	40.58±2.99 aA	42.34±1.29 abA

与林带距离 Distance from forest belt//m	毛管孔隙度 Capillary porosity//%			非毛管孔隙度 Non-capillary porosity//%		
	0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm	0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm
0	34.68±2.05 aA	34.69±1.43 abA	34.96±1.23 aA	6.54±3.38 aA	6.40±2.77 aA	5.97±1.27 aA
1.5	35.53±3.71 aA	36.68±1.96 aA	35.10±1.67 aA	5.59±2.04 aA	5.48±1.36 aA	7.54±4.78 aA
3.0	38.66±9.49 aA	33.71±1.69 bA	35.41±2.28 aA	6.48±1.57 aA	6.16±1.95 aA	6.75±1.19 aA
4.5	34.43±4.77 aA	34.03±2.16 bA	34.71±1.02 aA	7.58±5.09 aA	6.28±2.16 aA	5.71±0.56 aA
6.0	33.43±1.84 aB	34.82±1.22 abAB	35.34±0.97 aA	8.23±2.60 aA	5.76±2.15 aB	7.00±1.25 aAB

注:不同小写字母表示同一土层不同距离间差异性显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一距离不同土层间差异性显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicated significant difference between the same soil layer at different distances ( $P<0.05$ ); different capital letters indicated significant difference between different soil layers at the same distance ( $P<0.05$ )

**2.1.3 土壤持水量。**毛管水是土壤中可以移动的、对植物最有效的水分,所以毛管水对植物生长发育有重要的意义<sup>[17]</sup>。由表 3 可知,不同位置土壤持水量基本随土层深度增加而降低,即表层(0~20 cm)较高,中层、底层较低,不同位置土壤饱和和持水量的垂直变化幅度较小,除距林带 4.5 m 处各土层的饱和持水量差异不显著( $P>0.05$ )。林带和距林带 1.5 m 土壤毛管持水量变化幅度也较小,间作带(距离林带 3.0、4.5

和 6.0 m)的毛管持水量垂直变化幅度相对较大,如林带土壤表层毛管持水量为 24.56%,中层(>20~40 cm)和底层(>40~60 cm)分别比表层(0~20 cm)低 1.25 和 0.43 百分点,而距离林带 3.0 m 土壤表层毛管持水量为 28.32%,中层(>20~40 cm)和底层(>40~60 cm)分别比表层(0~20 cm)低 5.78 和 4.71 百分点,由此看出,间作带土壤毛管持水量主要集中在表土层最高,下两层都较低,这与其下层土壤的紧实度有关。

表 3 桉树-甘蔗复合系统不同取样位置土壤水分特征

Table 3 Soil moisture characteristics at different sampling locations of eucalyptus-sugarcane composite system

与林带距离 Distance from forest belt//m	饱和持水量 Saturated water holding capacity//%			毛管持水量 Capillary water holding capacity//%			田间持水量 Field water holding capacity//%		
	0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm	0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm	0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm
0	29.33±6.67 aA	27.62±2.70 aA	28.24±0.44 bA	24.56±3.69 aA	23.31±1.66 abA	24.13±1.05 aA	22.38±3.48 aA	21.14±1.41 abA	22.10±0.77 aA
1.5	28.13±2.73 aA	29.25±2.37 aA	29.28±4.24 aA	24.29±2.66 aA	25.15±1.92 aA	25.06±1.00 aA	22.57±2.62 aA	23.33±1.96 aA	22.72±1.13 aA
3.0	32.59±7.28 aA	26.71±3.71 aA	28.10±3.07 bA	28.32±8.09 aA	22.54±2.31 bA	23.61±2.47 aA	25.39±7.25 aA	20.41±2.10 bA	21.28±2.40 aA
4.5	32.36±2.87 aA	26.54±1.90 aB	27.26±0.87 bB	25.51±3.31 aA	21.93±2.00 bB	23.42±1.11 aAB	22.88±3.56 aA	20.17±1.59 bA	21.74±0.93 aA
6.0	29.77±3.29 aA	26.81±3.41 aA	29.21±1.72 abA	23.83±2.06 aA	22.96±2.02 abA	24.39±1.43 aA	21.27±1.36 aA	20.96±1.44 bA	22.74±1.61 aA

注:不同小写字母表示同一土层不同距离间差异性显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一距离不同土层间差异性显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicated significant difference between the same soil layer at different distances ( $P<0.05$ ); different capital letters indicated significant difference between different soil layers at the same distance ( $P<0.05$ )

土壤持水量在同层间的表现高低不一,但彼此相差不大。饱和持水量的剖面(0~60 cm 土层)平均排序为距离林带 1.5 m>距离林带 3.0 m>距离林带 4.5 m>距离林带 6.0 m>林带,前者比林带依次提高 5.4%、5.3%、4.0%、1.1%。毛管持水量的剖面平均排序为距林带 1.5 m>距林带 3.0 m>距林带 6.0 m>距林带 4.5 m>林带,与林带相比,前者依次提高 2.1%、2.0%、1.5%、1.4%,与距林带 1.5 m 处相比,间作带(距林带 3.0、4.5、6.0 m)毛管持水量比距林带 1.5 m 处略有降低,但差异均未达到显著水平。田间持水量平均排序为距林带 1.5 m>距林带 3.0 m>距林带 6.0 m>距林带 4.5 m>林带,前者依次比林带提高 2.9%、1.4%、1.3%、0.2%。距林带 6.0、4.5 m 处土壤最大持水量虽高于 1.5 m 处,但毛管持水量、田间持水量均

低于距林带 1.5 m 处,说明空白间隔(距离林带 1.5 m 处)的休耕管理,加上作物废弃物的堆置,其物理性状的改善效果较理想,土壤持水性能增强,间作带作物在生长期存在土壤水分的吸收竞争;可能桉树根系与间作带边缘作物存在某种程度的竞争,造成距林带 3.0 m 处当季土壤持水量略有降低;林带土壤毛管水的降低可能与桉树是一种高蒸腾树种,光合效率高,需水性能强,林带株行距较小(行距 1.3 m,株距 ≤1.5 m),土壤较为紧实且根系对毛管水的竞争激烈有关。生产上可适当加大林带桉树的株行距,缓解林带根系的生长竞争及土壤的板结现象<sup>[18]</sup>。

实行桉树-甘蔗复合经营,由于人们的正向干预,改善了间作带、空白间隔带土壤的物理性状,农作物收获后,废弃物

(根、茎、叶等)自然回田,在土壤微生物的作用下,能产生大量腐殖质,改善土壤通透性,增强土壤保水保肥能力,土壤理化性状向良性转化,从而促进土壤中水、肥、气、热的协调,加速了土壤熟化<sup>[19-20]</sup>,在保证综合效益不降低的情况下提高了土地利用量,增加了生物多样性和稳定性,解决了桉树传统纯林、连栽对土壤环境造成的不良影响,有利于生态系统养分的循环<sup>[21-22]</sup>。

**2.2 土壤各物理指标间相关性分析** 为了研究各物理指标之间的相关性,对各指标进行 Pearson 相关性分析。由表 4 可知,在桉树-甘蔗复合经营系统中,土壤容重与总孔隙度和毛管孔隙度均呈负相关,其中与毛管孔隙度呈显著负相关( $P<0.05$ )。与林带距离呈不显著负相关( $P>0.05$ ),相关系数仅为-0.001。这说明土壤容重在距离上表现出的显著差异并不是由距离决定的,而很可能是与不同林带位置的经营方

式不同有关。土壤的饱和持水量、毛管持水量、田间持水量与土壤容重呈极显著负相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为-0.845、-0.638、-0.560,土壤的饱和持水量、毛管持水量、田间持水量与土壤毛管孔隙度呈极显著正相关性,相关系数分别为0.623、0.899、0.923,同时3个持水量之间也呈极显著正相关,但饱和持水量、毛管持水量、田间持水量与林带距离的相关性无一定的规律性,其中饱和持水量与距离呈不显著正相关,毛管持水量、田间持水量均与距离呈不显著负相关且相关系数极小。从土层的角度分析,土壤容重与土层呈极显著正相关,饱和持水量与土层呈显著负相关,与土壤持水量呈负相关,与孔隙度多呈正相关,且均表现为不显著相关性。由此证明,桉树-甘蔗复合经营系统的表层土壤容重小,孔隙度大,持水性和含水性较强,整体好于深层土壤。

表 4 各物理指标间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis among physical indexes

指标 Index	土壤容重 Soil bulk density	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	饱和持水量 Saturated water holding capacity	毛管持水量 Capillary water holding capacity	田间持水量 Field water holding capacity
总孔隙度 Total porosity	-0.135						
毛管孔隙度 Capillary porosity	-0.244*	0.211					
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	-0.121	0.998**	0.153				
饱和持水量 Saturated water holding capacity	-0.845**	0.941**	0.623**	0.535**			
毛管持水量 Capillary water holding capacity	-0.638**	0.216	0.899**	0.164	0.877**		
田间持水量 Field water holding capacity	-0.560**	0.213	0.923**	0.159	0.839**	0.984**	
距离 Distance	-0.001	-0.031	-0.109	-0.025	0.023	-0.078	-0.101
土层 Soil layer	0.336**	0.033	-0.053	0.037	-0.255*	-0.205	-0.171

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上极显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

Note: \*\* was significantly correlated at the 0.01 level (bilateral); \* was significantly correlated at the 0.05 level (bilateral)

### 3 结论

通过对在 3 年生宽窄行种植模式的桉树林内按一定株行距间作甘蔗的桉树-甘蔗复合经营系统在不同取样位置(距离林带 1.5、3.0、4.5、6.0 m 处)按 0~20、>20~40、>40~60 cm 划分土层并将其各物理性状指标用 LSD 法进行单因素 ANOVA 分析,研究了土壤物理性质在间作带和休闲空白间隔间的土层差异性。同时对各物理性状进行了相关性分析,研究了各指标间的相关性。

(1) 实行桉树-甘蔗复合经营后,间作带(距离林带 1.5、3.0、4.5、6.0 m 处)的土壤容重在不同土层间差异显著,间作带表层的土壤容重降低明显,同层相比,在 0~20 cm 土层土壤容重的排列顺序均为距离林带 6.0 m<距林带 4.5 m<距离林带 3.0 m<林带<距林带 1.5 m,说明间作对土壤容重的降低作用随距离呈正相关。土壤孔隙状况随土层的变化规律不明显,但总体来说间作带的土壤总孔隙度相比林带有所增加,各层总孔隙度表现为距离林带 3.0 m>距离林带 1.5 m>距离林带 6.0 m>距离林带 4.5 m>林带,前者依次比林带高 3.3%、3.0%、2.1%、1.6%,土壤的通透性有所增加。

(2) 桉树-甘蔗复合经营改善了土壤持水状况,提高了空白间隔(距离林带 1.5 m 处)的持水能力,桉树根系可能与间作带的边缘作物存在竞争,使间作带的毛管持水量、田间持水量均低于距林带 1.5 m 处,但均未达到显著差异水平( $P>0.05$ )。

(3) 桉树-甘蔗复合经营系统下,土壤容重与总孔隙度和毛管孔隙度均呈负相关,其中与毛管孔隙度呈显著负相关( $P<0.05$ )。土壤的饱和持水量、毛管持水量、田间持水量与土壤容重呈极显著负相关( $P<0.01$ ),从土层的角度分析,土壤容重与土层呈极显著正相关,饱和持水量与土层呈显著负相关。桉树-甘蔗复合经营对土壤物理性状的改善主要集中在表层。

### 参考文献

- [1] 殷亚方,姜笑梅,吕建雄,等.我国桉树人工林资源和木材利用现状[J].木材工业,2001,15(5):3-5.
- [2] 王震洪,段昌群,起联春,等.我国桉树林发展中的生态问题探讨[J].生态学杂志,1998,17(6):65-68.
- [3] 项东云.华南地区桉树人工林生态问题的评价[J].广西林业科学,2000,29(2):57-64.

(下转第 156 页)

肥技术可有效减少肥料的流失,保护生态环境,实现作物高产和农民增收增效。

表4 各处理的经济效益分析

Table 4 Economic benefit analysis of each treatment

处理 Treatment	产量 Yield kg/hm <sup>2</sup>	产值 Output value 元/hm <sup>2</sup>	肥料成本 Fertilizer cost 元/hm <sup>2</sup>	纯收入 Net income 元/hm <sup>2</sup>
FP	8 793.0	21 103.1	1 318.3	19 784.8
FP-N	6 968.8	16 725.2	614.6	16 110.6
FP-P	8 385.9	20 126.1	916.5	19 209.6
FP-K	8 214.9	19 715.7	1 105.5	18 610.2
OPT	8 937.7	21 450.5	1 364.5	20 086.0
OPT -N	7 206.6	17 295.9	769.1	16 526.8
OPT -P	8 502.0	20 404.8	935.9	19 468.9
OPT -K	8 328.2	19 987.7	1 024.0	18 963.7

注:尿素 1.66 元/kg;氯化钾 2.27 元/kg;过磷酸钙 1.00 元/kg;单季稻谷 2.40 元/kg

Note: Urea is 1.66 yuan /kg; potassium chloride is 2.27 yuan /kg; calcium superphosphate is 1.00 yuan /kg; single season rice is 2.40 yuan /kg

#### 4 结论

(1) 测土配方施肥较常规施肥水稻产量增加 144.7 kg/hm<sup>2</sup>,在测土配方施肥条件下,全素区比缺氮、磷、钾区分别增产 1731.1、435.7、609.5 kg/hm<sup>2</sup>,增产率为 24.0%、5.1%、7.3%。

(2) 测土配方施肥中氮、磷、钾肥料利用率分别为 39.7%、13.7%、55.9%,比常规施肥氮、磷、钾肥利用率分别提

高 4.4 百分点、0.4 百分点、2.3 百分点。

(3) 测土配方施肥较常规施肥经济效益增加 301.2 元/hm<sup>2</sup>,经济效益增加显著。

#### 参考文献

- [1] 国家统计局.2018 中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [2] 闫湘,金继运,梁鸣早.我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用率[J].土壤,2017,49(6):1067-1077.
- [3] 王迪轩,何咏梅,李建国.新编肥料使用技术手册[M].北京:化学工业出版社,2016.
- [4] 闫湘,金继运,何萍,等.提高肥料利用率技术研究进展[J].中国农业科学,2008,41(2):450-459.
- [5] 毛振荣,王君.提高水稻肥料利用率的技术探讨[J].中国稻米,2019,25(1):100-102.
- [6] 自由路,杨俐苹.我国农业中的测土配方施肥[J].土壤肥料,2006(2):3-7.
- [7] 孙义祥,袁姗姗,郭熙盛.玉米专用肥配方设计与效果验证[J].中国农学通报,2012,28(18):117-121.
- [8] 袁姗姗,邬刚,孙义祥.水稻专用配方肥的肥效研究[J].广东农业科学,2013,40(12):72-74.
- [9] 胡斌,张民,刘春生.测土配方施肥对鲁西地区提高棉花产量及肥料利用效率的效果[J].中国棉花,2014,41(9):19-22.
- [10] 邬刚,刘宏伟,袁姗姗,等.测土配方施肥对花生生长和养分吸收的影响[J].安徽农业科学,2013,41(5):2033-2034.
- [11] 方谋明,枞阳县早稻肥料利用率田间试验[J].安徽农学通报,2018,24(16):71-72.
- [12] 张新华,王少华.水稻测土配方施肥对肥料利用率的影响[J].现代农业科技,2019(12):2-3.
- [13] 王海候,沈明星,刘凤军,等.施氮量对杂交粳稻常优 1 号产量及氮肥吸收利用的影响[J].江苏农业科学,2007(4):9-11,42.
- [14] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [15] 汤婧.水稻肥料利用率田间试验初报[J].北方水稻,2019,49(1):41-42,45.
- [16] 国家林业局.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999.
- [17] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等.小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2004,18(6):1-5.
- [18] 吴长文,王礼先.林地土壤孔隙的贮水性能分析[J].水土保持研究,1995,2(1):76-79.
- [19] 张希彪,上官周平.人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J].生态学报,2006,26(11):3685-3695.
- [20] HUANG W W, REDDY G V P, SHI P J, et al. Allelopathic effects of *Cinnamomum septentrionale* leaf litter on *Eucalyptus grandis* saplings [J/OL]. Global ecology and conservation, 2020, 21 [2019-12-05]. http://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00872.
- [21] 刘殊,廖镜思,陈清西,等.果园生草对龙眼园微生气候和光合作用的影响[J].福建农业大学学报,1996,25(1):24-28.
- [22] 何电源.中国南方土壤肥力与栽培植物施肥[M].北京:科学出版社,1994:23-25.
- [23] 朱智强.桉树林农条带间作模式效应研究[D].儋州:华南热带农业大学,2005.
- [24] 廖观荣,钟继洪,李淑仪,等.桉树人工林生态系统养分循环与平衡研究 IV.桉树林间种山毛豆对生态系统养分循环的作用[J].生态环境,2003,12(4):440-442.

(上接第 122 页)

- [4] 叶绍明,温远光,张慧东.连栽桉树人工林土壤理化性质的主分量分析[J].水土保持通报,2010,30(5):101-105.
- [5] 刘月秀,李银,曹福亮.广东桉树林土壤物理性质及其影响因子分析[J].林业科技开发,2012,26(4):13-18.
- [6] 叶绍明.广西桉树工业人工林经营模式研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [7] 于福科,黄新会,王克勤,等.桉树人工林生态退化与恢复研究进展[J].中国生态农业学报,2009,17(2):393-398.
- [8] 张燕.桉树人工林混农复合生态系统效益评估[D].儋州:华南热带农业大学,2007.
- [9] 林培群,余雪标,刘苇,等.桉农间作系统对土壤性质变化的影响研究[J].广东农业科学,2010,37(1):24-27.
- [10] 王会利,曹继钊,孙孝林,等.桉树-牧草复合经营模式下水土流失和土壤肥力的综合评价[J].土壤通报,2016,47(6):1468-1474.
- [11] 吴远媚.桉树林下套种草珊瑚的研究[D].南宁:广西大学,2017.
- [12] 邓荫伟,张敏,姚吉霞,等.桉树林下金花茶不同密度栽培试验[J].中国林副特产,2016(4):19-22.
- [13] 刘苇,余雪标.桉树人工林林下间作绿肥对土壤的改良效应研究[J].热带林业,2008(2):16-20.