

厚竹笋用林冬季二次覆盖措施对土壤温度及 CO₂ 排放的影响

陈豪¹, 邱盛媛¹, 申展^{1,2}, 杨飞强¹, 周泽敏¹, 黎祖尧^{1,2*}

(1. 江西农业大学林学院, 南昌 330045; 2. 江西省竹子种质资源与利用重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 为探索笋用林在冬季采用二次覆盖措施的土壤温度和 CO₂ 排放速率及动态变化情况, 分析枯饼施用量和谷壳覆盖层厚度对土壤温度和 CO₂ 排放速率的影响, 为凝练高效低碳覆盖模式提供参考, 设计枯饼(发热物质)施用量 15 和 18 t·hm⁻²、谷壳层(保温材料)厚度 30 和 40 cm, 分 2 次覆盖于林地, 共 4 种覆盖模式, 预埋地温计每天观测土壤温度, 采用 Li-8100A 土壤碳通量自动测定系统每天测定土壤 CO₂ 排放速率。结果表明, 厚竹笋用林冬季林地二次覆盖措施对土壤温度和 CO₂ 排放速率均有显著影响 ($P < 0.05$)。覆盖期内土壤温度呈现双峰型动态曲线变化, 第 1 次和第 2 次覆盖后均出现一个明显的高温峰值区; 土壤 CO₂ 排放速率呈现单峰型动态曲线变化, 峰值出现在第 2 次覆盖后。不同覆盖模式间土壤温度和 CO₂ 排放速率的动态变化规律相似, 但峰谷值存在显著差异 ($P < 0.05$)。随着枯饼施用量的增加和谷壳覆盖层厚度的增厚, 土壤温度升高, CO₂ 排放速率加快; 谷壳覆盖层厚度是影响土壤温度和 CO₂ 排放的主要因素, 30 和 40 cm 谷壳层厚度之间的土壤温度和 CO₂ 排放速率均存在显著差异 ($P < 0.05$), 15 与 18 t·hm⁻² 枯饼施用量间的土壤温度和 CO₂ 排放速率差异性不显著 ($P > 0.05$)。土壤温度与土壤 CO₂ 排放速率之间存在显著正相关性。厚竹笋用林林地冬季二次覆盖措施可显著提高土壤温度和 CO₂ 排放速率, 综合考虑增温及低碳排放效果, 二次覆盖时, 以第 1 次覆盖施用枯饼 7.5 t·hm⁻²、覆盖谷壳 10 cm, 第 2 次覆盖施用枯饼 10.5 t·hm⁻²、覆盖谷壳 20 cm 的模式较好。

关键词: 厚竹笋用林; 二次覆盖; 土壤温度; CO₂ 排放速率; 枯饼; 谷壳

中图分类号: S795

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)06-0885-08

Effects of winter secondary mulching measures on soil temperature and CO₂ emissions of *Phyllostachys edulis* 'Pachyloen' shoot forest

CHEN Hao¹, QIU Shengyuan¹, SHEN Zhan^{1,2}, YANG Feiqiang¹, ZHOU Zemin¹, LI Zuyao^{1,2}

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045;

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization, Nanchang 330045)

Abstract: In order to provide a reference for condensing the high-efficiency and low-carbon coverage model, we explored the soil temperature, CO₂ emission rate and dynamic changes of bamboo shoot forests with secondary mulching measures in winter, and analyzed the effects of dry cake application amount and chaff cover thickness on soil temperature and CO₂ emission rate. The application rate of dry cake (heat-generating material) was designed to be 15 and 18 t·hm⁻², and the thickness of chaff layer (insulation material) was 30 cm and 40 cm. The woodland was covered twice, with a total of four covering modes. The soil temperature was observed with a pre-buried geothermometer, and the soil CO₂ emission rate was measured every day using Li-8100A soil carbon flux automatic measurement system. As results, the secondary mulching measures of bamboo shoot forest in winter had significant effects on soil temperature and CO₂ emission rate ($P < 0.05$). During the mulching period, the soil temperature showed a change trend of bimodal dynamic curve, and there was an obvious high temperature peak area after the first and second mulching; the soil CO₂ emission rate showed a change trend of unimodal dynamic curve, and the peak appeared after the second mulching; the dynamic changes of soil temperature and CO₂ emission rate among different mulching patterns were similar, but there were significant differences in peak and valley values ($P < 0.05$). With the increase of the dry cake application rate and the thickening of the chaff cover, the soil temperature increased, and

收稿日期: 2022-03-04

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2015BAD04B01)和江西省林业局林业科技创新专项([2019]02号)共同资助。

作者简介: 陈豪, 硕士研究生。E-mail: arnobiubiubi@163.com

* 通信作者: 黎祖尧, 教授。E-mail: jxlizuyao@126.com

the CO₂ emission rate accelerated; the thickness of the chaff cover was the main factor affecting the soil temperature and CO₂ emission, and there were significant differences in soil temperature and CO₂ emission rate between the thicknesses of 30 and 40 cm ($P < 0.05$), while there was no significant difference in soil temperature and CO₂ emission rate between 15 and 18 t·hm⁻² dry cake application rates ($P > 0.05$). There was a significant positive correlation between soil temperature and soil CO₂ emission rate. In conclusion, secondary mulching measures in thick bamboo woodland in winter can significantly increase soil temperature and CO₂ emission rate. Considering the effects of temperature increase and low carbon emission comprehensively, it is better to cover 7.5 t·hm⁻² of dry cake and 10 cm of chaff in the first mulching, and apply 10.5 t·hm⁻² of dry cake and 20 cm of chaff in the second mulching.

Key words: *Phyllostachys edulis* ‘Pachyloen’ bamboo shoot forest; secondary mulching; soil temperature; CO₂ emission rate; dry cake; chaff

笋用林覆盖是指冬季在林地增施枯饼等发热物质,并覆盖谷壳等保温材料,通过发酵增温来提高土壤温度,改变竹笋自身的生长发育规律,达到提早出笋、提高出笋量、增加笋用林经济效益的一种竹林经营管理模式^[1]。前人研究表明,使用的覆盖物质及施用量不同,土壤温度的峰值、谷值及动态变化规律不同^[2-4]。采用有机物覆盖可以改善土壤理化性质,提高土壤养分供应能力及土壤微生物种群和数量^[5-6]。土壤温度的升高也会引起土壤酶和土壤微生物的变化,进而影响土壤的养分和质量^[7-8],如降低土壤 pH,提高土壤碱解氮、速效钾、速效磷和有机质含量等^[9]。科学的覆盖措施可在一定程度上改良土壤^[10],但不合理的覆盖或长期覆盖经营会造成土壤养分失衡^[11]。相关研究表明,土壤细菌群落中的装甲菌门和芽单胞菌门是影响土壤 CO₂-C 排放的首要因子^[12],而有机覆盖物能为土壤微生物提供营养基质,间接影响土壤 CO₂ 排放。覆盖模式不同,土壤温度不同,土壤呼吸作用产生的 CO₂ 排放量也不同^[13]。如冬小麦生育期采用全量秸秆覆盖的土壤平均 CO₂ 呼吸速率为 1.47 μmol·m⁻²·s⁻¹,而生育期采用地膜覆盖的土壤平均 CO₂ 呼吸速率为 3.63 μmol·m⁻²·s⁻¹^[14],秸秆和地膜覆盖均显著促进早作玉米田土壤 CO₂ 排放^[15]。Fu 等^[16]的研究表明,秸秆覆盖对玉米地土壤日呼吸速率和累积土壤呼吸的影响较大,秸秆覆盖处理的土壤呼吸显著高于不覆盖处理,且呼吸速率随温度的升高而增加;Wang 等^[17]发现,地膜覆盖显著增加土壤 CO₂ 排放,秸秆覆盖下 CO₂ 排放有所增加但程度不显著;商雨晴等^[18]也发现,与不覆盖相比,秸秆覆盖处理的土壤呼吸速率和累积碳排放量均有显著提高,可通过增加土壤有机质的输入促进土壤呼吸。目前,笋用林覆盖常用的是一次性将全部发热物质和保温材料铺于林地,优点是简单方便,但由于一次性将大量发热物质铺于林地,加之覆盖了较厚的保温层,土壤温度难以控制,并且由于早期气温较高,土壤容易受到

高温胁迫,造成减产甚至母竹受损现象^[19]。

笋用林二次覆盖模式是指将发热物质和保温材料分 2 次覆盖于林地上。第 1 次覆盖施用发热物质总量的 50%左右,谷壳保温层覆盖厚度 10 ~ 20 cm;第 2 次覆盖于第 1 次覆盖 3~4 周后进行,在第 1 次覆盖的保温材料上面增施发热物质和覆盖保温材料。分 2 次覆盖可有效延长并控制发热物质的发热期和土壤高温期,提高竹笋的产量和效益,同时避免发生覆盖初期气温较高造成土壤高温胁迫^[19]的问题。目前,关于二次覆盖模式下土壤温度和 CO₂ 排放的动态变化规律及发热物质施用量和保温层厚度的影响程度等问题尚鲜见报道。厚竹 (*Phyllostachys edulis* ‘Pachyloen’) 是江西省特有的笋、材品质均优的毛竹 (*Ph. edulis*) 变异类型,因竹秆壁厚且性状稳定而不同于毛竹,2008 年获国家林业局植物新品种权^[20],2017 年被审定为国家级优良品种。厚竹笋的营养成分含量高于毛竹笋,且大小年差异不明显^[21-22],作为笋用竹种有广阔的推广前景。本试验以厚竹笋用林为对象,研究二次覆盖措施下,覆盖期内土壤的温度和 CO₂ 排放速率的动态变化规律,并分析枯饼(发热物质)施用量和谷壳(保温材料)层厚度对土壤温度和 CO₂ 排放速率的影响,旨在为进一步研究高效低碳的厚竹笋用林二次覆盖模式提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于江西省贵溪市塘湾镇,28°17′44.91″ N,117°14′24.26″ E,海拔 50 m,属亚热带季风湿润气候,光照充足,雨量丰沛,无霜期长。年平均气温 18.2 °C,最冷月平均气温 10 °C,极端低温 -5 °C。试验区地势平坦,灌溉条件良好,土壤类型为红壤,土层深厚 >60 cm,微酸性,适宜厚竹生长。试验区内 2013 年营造成片厚竹林面积 15 hm²,林分生长正常,立竹密度 9 000 株·hm⁻²,立竹平均胸径 4 cm。

表 1 样地覆盖模式

Table 1 Plot coverage modes

| 覆盖模式 | 第 1 次覆盖 | | 第 2 次覆盖 | |
|------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
| | 枯饼施用量/(t·hm ⁻²) | 谷壳覆盖厚度/cm | 枯饼施用量/(t·hm ⁻²) | 谷壳覆盖厚度/cm |
| I | 7.5 | 10 | 7.5 | 20 |
| II | 7.5 | 10 | 10.5 | 20 |
| III | 7.5 | 20 | 7.5 | 20 |
| IV | 7.5 | 20 | 10.5 | 20 |
| CK | 0 | 0 | 0 | 0 |

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 样地设置: 将试验区分为 4 片 (4 个重复), 每片设置 5 个试验样地, 每个样地面积 36 m² (6 m×6 m), 随机安排 1 种覆盖模式 (表 1)。在每个样地中央 (5 m×5 m 范围内) 划分 25 个 1 m×1 m 的样方, 选择正中央、东北角和西南角 3 个样方作为土壤温度和 CO₂ 排放速率的调查样方。在每个调查样方中预埋 1 个直径 20 cm 的 PVC 管 (土壤 CO₂ 排放通量测量筒), 1 组地温计 (0、10 和 20 cm 土层各一只, 地温计精度为 0.1℃)。

样地覆盖: 采用分二次覆盖模式。第 1 次覆盖时间为 2019 年 12 月 3 日, 首先在每个调查样方中预埋 1 组地温计, 然后对林地浇水至湿润土层 15 cm; 浇水后, 按照样地覆盖模式编号, 将设计的第 1 次枯饼施用量均匀撒施于整个样地; 撒施枯饼后, 在所调查样方中放置 1 根 PVC 管, PVC 管的长度为本样地覆盖模式的 2 次谷壳覆盖厚度之和再加 6 cm, 最后覆盖新鲜谷壳至本样地所设计的第 1 次谷壳覆盖厚度要求, PVC 管内覆盖同样厚度的谷壳。第 2 次覆盖于 2019 年 12 月 24 日, 先将该样地第 2 次覆盖的设计枯饼用量均匀撒施于第 1 次覆盖的谷壳上方 (含 PVC 管内), 然后再覆盖 20 cm 的新鲜谷壳。

1.2.2 土壤温度和 CO₂ 排放速率测量 自 2019 年 12 月 05 日起至 2020 年 1 月 22 日, 每天 10:00—12:00 观测不同土层土壤温度, 13:00—14:00 用 Li-8100A 土壤碳通量自动测量系统测量土壤 CO₂ 排放速率。

1.2.3 数据分析 采用 Microsoft Excel 2019 整理数据; SPSS26 统计分析软件对数据进行分析; OriginPr2020 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 二次覆盖模式对土壤温度的影响

2.1.1 覆盖期内土壤温度动态变化规律 由图 1 可知, 与一次性覆盖措施下土壤温度呈单峰型曲线动

态变化^[2]不同, 厚竹笋用林林地实施二次覆盖模式时, 覆盖期内土壤温度呈双峰型曲线变化。第 1 次覆盖因为谷壳层较薄, 保温效果较差, 覆盖后土壤温度缓慢上升, 2 周后达到峰值; 之后由于发热量随着未分解发热物质的减少而减小, 土壤温度下降。第 2 次覆盖时增加了发热物质, 同时加厚了谷壳层, 保温效果加强, 加上土壤温度已较高, 微生物活动旺盛, 所以第 2 次覆盖后土壤温度快速上升, 1 周后即达到第 2 个峰值。之后随着未分解发热物质的逐渐减少及环境温度的下降, 土壤温度也开始缓慢下降。4 种覆盖模式的土壤温度动态变化基本一致, 但由于枯饼施用量和谷壳层厚度不同, 不同覆盖模式的高温峰值及变化幅度有所不同。不同土层深度的温度变化规律基本一致, 但随着土层深度的增加, 土壤温度动态变化比较平稳, 高温峰值出现时间推迟, 峰谷值之间的差值缩小。原因是土壤具有一定的隔热保温作用, 随着土层深度的增加, 土壤温度变化对地表及大气温度的响应强度减弱^[23]。

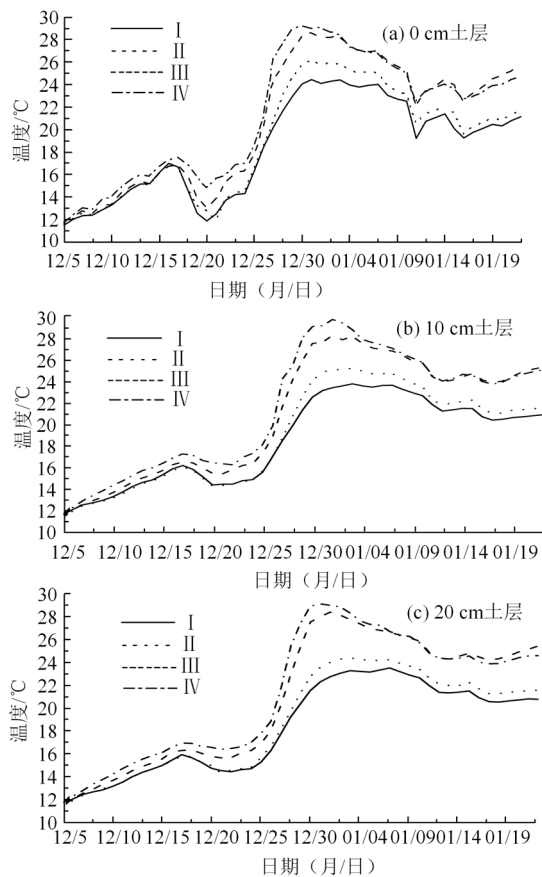


图 1 覆盖期内土壤温度动态变化

Figure 1 Dynamic changes of temperature in soil layers at different depths

2.1.2 枯饼施用量和谷壳层厚度对土壤温度的影响 由表 2 可知, 同一土层不同覆盖模式间整个覆盖

期内的平均土壤温度差异显著 ($P < 0.05$), 说明覆盖模式对土壤温度的影响显著; 同一覆盖模式不同土层之间的温度差异不显著 ($P > 0.05$), 说明土层厚度对土壤温度有一定影响, 但影响程度不显著。进一步分析覆盖期内不同时期不同覆盖模式间表层土壤温度的差异性, 结果 (表 3) 显示, 覆盖后的前 1 周不同覆盖模式之间的表层土壤温度均无显著差异 ($P > 0.05$), 但覆盖后的第 3 周开始, 特别是第 2 次覆盖之后, 不同覆盖模式间的表层土壤温度出现

了显著差异, 并且均是模式 III 和模式 IV 的表层土壤温度显著高于模式 I 和模式 II, 说明 40 cm 厚谷壳层的保温效果显著高于 30 cm 厚的谷壳层, 但 10 cm 和 20 cm 厚的谷壳层保温效果差异不显著。另外, 整个覆盖期内, 表层土壤温度基本上都表现为: 模式 II > 模式 I、模式 IV > 模式 III, 但差异性未达到显著程度, 说明增加枯饼施用量可提高土壤温度, 但 15 和 18 t·hm⁻² 的枯饼施用量对表层土壤温度的影响不显著。

表 2 不同处理模式的土壤温度 (均值±标准差)

Table 2 Soil temperature under different treatment modes (mean ± standard deviation)

°C

| 处理模式 | 土层 | | |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 0 cm | 10 cm | 20 cm |
| I | 18.56±4.45 ^{ba} | 18.57±3.85 ^{ba} | 18.42±3.56 ^{ba} |
| II | 19.19±4.84 ^{ba} | 19.02±4.30 ^{ba} | 18.83±3.92 ^{ba} |
| III | 21.01±5.97 ^{aA} | 20.85±5.43 ^{aA} | 20.62±5.05 ^{aA} |
| IV | 21.45±5.69 ^{aA} | 21.41±5.45 ^{aA} | 21.02±5.06 ^{aA} |

注: 同列不同小写字母表示不同覆盖模式差异显著 ($P < 0.05$), 同行不同大写字母表示不同土层差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 不同覆盖模式 0 cm 土层温度 (均值±标准差)

Table 3 The temperature in soil layer of 0 cm with different coverage modes (mean ± standard deviation)

°C

| 日期 (年/月/日) | 模式 I 温度 | 模式 II 温度 | 模式 III 温度 | 模式 IV 温度 |
|------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2019/12/06 | 12.03±0.61 ^a | 12.08±0.63 ^a | 12.31±0.74 ^a | 12.4±0.59 ^a |
| 2019/12/08 | 12.38±0.27 ^a | 12.34±0.19 ^a | 12.54±0.42 ^a | 12.87±0.41 ^a |
| 2019/12/10 | 13.27±0.49 ^a | 13.25±0.53 ^a | 13.28±0.43 ^a | 13.97±0.58 ^a |
| 2019/12/12 | 14.66±0.58 ^a | 14.63±0.74 ^a | 14.91±0.95 ^a | 15.48±0.77 ^a |
| 2019/12/14 | 15.18±0.47 ^a | 15.08±0.73 ^a | 15.13±0.42 ^a | 15.84±0.68 ^a |
| 2019/12/16 | 16.97±0.73 ^a | 16.88±1.00 ^a | 16.68±0.78 ^a | 17.27±0.56 ^a |
| 2019/12/18 | 14.63±0.68 ^b | 14.74±0.92 ^b | 15.91±0.89 ^{ab} | 16.91±0.73 ^a |
| 2019/12/20 | 11.87±0.85 ^b | 12.77±0.92 ^b | 13.04±1.52 ^{ab} | 14.78±1.03 ^a |
| 2019/12/22 | 13.71±0.62 ^b | 13.84±0.81 ^b | 15.28±0.83 ^a | 15.92±0.71 ^a |
| 2019/12/24 | 14.29±0.64 ^b | 14.48±0.63 ^b | 16.28±0.84 ^a | 16.97±1.30 ^a |
| 2019/12/26 | 18.48±1.46 ^b | 18.53±1.43 ^b | 20.4±1.89 ^{ab} | 21.16±1.63 ^a |
| 2019/12/28 | 21.65±2.90 ^c | 23.02±2.47 ^b | 26.87±3.49 ^{ab} | 28.89±1.70 ^a |
| 2019/12/30 | 24.01±2.80 ^b | 25.84±2.02 ^b | 28.89±1.92 ^a | 29.74±0.83 ^a |
| 2020/01/01 | 24.07±1.87 ^b | 25.78±1.11 ^b | 28.83±1.31 ^a | 29.38±1.2 ^a |
| 2020/01/03 | 24.38±1.30 ^b | 25.83±0.73 ^b | 28.23±1.24 ^a | 28.43±1.55 ^a |
| 2020/01/05 | 23.75±1.08 ^b | 25.02±0.54 ^b | 26.98±1.06 ^a | 27.14±1.71 ^a |
| 2020/01/07 | 23.98±0.92 ^b | 25.02±0.55 ^{bc} | 26.95±1.07 ^a | 26.78±1.62 ^{ac} |
| 2020/01/09 | 22.68±0.94 ^b | 23.36±0.53 ^b | 25.61±1.12 ^a | 25.43±1.37 ^a |
| 2020/01/11 | 19.19±2.10 ^b | 20.56±1.27 ^{ab} | 22.01±2.65 ^a | 22.52±1.64 ^a |
| 2020/01/13 | 21.03±0.85 ^b | 21.65±0.41 ^b | 23.82±1.19 ^a | 23.66±1.15 ^a |
| 2020/01/15 | 20.05±1.96 ^b | 21.45±0.72 ^b | 23.91±2.77 ^a | 23.61±1.30 ^a |
| 2020/01/17 | 19.74±0.94 ^b | 20.28±0.67 ^b | 23.23±1.61 ^a | 22.93±1.37 ^a |
| 2020/01/19 | 20.43±0.95 ^b | 20.98±0.71 ^b | 24.46±2.13 ^a | 23.88±1.89 ^a |
| 2020/01/21 | 20.77±1.09 ^b | 21.33±0.83 ^b | 25.16±2.47 ^a | 24.40±2.14 ^a |

注: 同行中不同小写字母表示同一天不同覆盖模式的土壤温度有显著性差异 ($P < 0.05$)。

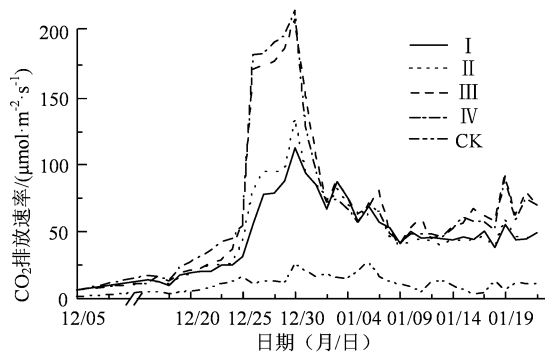


图 2 不同覆盖模式的 CO₂ 日排放速率动态变化
Figure 2 The dynamic change of CO₂ emission rate under different coverage modes

2.2 二次覆盖对土壤 CO₂ 排放速率的影响

2.2.1 覆盖期内土壤 CO₂ 排放速率动态变化规律

从图 2 看出, 4 种覆盖模式覆盖期内土壤 CO₂ 排放速率的动态变化均呈单峰型曲线变化。第 1 次覆盖后, 土壤 CO₂ 排放速率缓慢上升; 第 2 次覆盖后的次日土壤 CO₂ 排放速率急剧升高, 之后缓慢上升, 1 周后达到峰值, 之后快速下降, 3 天后下降速度变

缓并出现小幅波动。未覆盖竹林的土壤 CO₂ 排放速率峰值和平均值均远低于覆盖竹林, 而且变化比较平稳。与一次覆盖模式^[23]比较, 二次覆盖模式的土壤 CO₂ 排放速率显著提高, 并且出现了第 2 次覆盖后第 3 日急速上升及 1 周后急速下降的现象。4 种覆盖模式的土壤 CO₂ 排放速率的峰值差异大, 但动态变化规律相似。

2.2.2 枯饼用量及谷壳层厚度对土壤 CO₂ 排放速率的影响 比较不同覆盖模式下土壤 CO₂ 排放速率的差异性, 结果如表 4 (表中数据表示整个覆盖期内 4 块重复处理样地的 CO₂ 排放速率的均值)。覆盖期内, 4 种覆盖模式的土壤 CO₂ 平均排放速率均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 说明覆盖处理显著提高了土壤的 CO₂ 排放量。4 种覆盖模式间的土壤 CO₂ 排放速率存在显著差异, 其中不同谷壳层厚度处理的间差异显著, 而不同枯饼施用量间的差异不显著, 说明覆盖模式对土壤 CO₂ 排放速率的影响显著, 影响 CO₂ 排放速率的主要因素是谷壳覆盖层厚度。

表 4 不同覆盖模式下的 CO₂ 排放速率 (均值±标准差)

Table 4 CO₂ emission rates in different coverage modes (mean ± standard deviation) ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

| CK | 模式 I | 模式 II | 模式 III | 模式 IV |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 11.44±6.19 ^c | 48.53±30.54 ^b | 49.84±32.68 ^b | 71.32±59.32 ^a | 70.98±59.71 ^a |

注: 同行中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 5 不同日期 4 种覆盖模式下的 CO₂ 排放速率 (均值±标准差)

Table 5 CO₂ emission rates on different dates under four coverage modes (mean ± standard deviation) ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

| 日期 (年/月/日) | 模式 I | 模式 II | 模式 III | 模式 IV |
|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2019/12/05 | 6.00±2.71 ^a | 6.57±2.29 ^a | 6.64±2.62 ^a | 6.33±1.84 ^a |
| 2019/12/16 | 13.67±5.27 ^a | 11.38±3.09 ^a | 11.68±3.16 ^a | 17.22±11.64 ^a |
| 2019/12/18 | 9.37±4.01 ^a | 10.64±2.86 ^a | 13.35±3.99 ^a | 13.87±5.12 ^a |
| 2019/12/20 | 18.90±6.17 ^a | 18.31±4.80 ^a | 21.23±5.34 ^a | 27.53±14.44 ^a |
| 2019/12/22 | 20.06±3.85 ^b | 26.16±8.81 ^{ab} | 27.00±8.64 ^{ab} | 36.05±17.63 ^a |
| 2019/12/24 | 24.66±8.46 ^b | 26.18±7.34 ^b | 36.62±13.19 ^{ab} | 44.94±16.82 ^a |
| 2019/12/26 | 55.52±17.81 ^b | 81.39±40.57 ^b | 171.22±60.68 ^a | 181.98±52.64 ^a |
| 2019/12/28 | 78.73±31.48 ^b | 94.59±52.25 ^b | 177.15±58.07 ^a | 191.44±40.93 ^a |
| 2019/12/30 | 112.64±49.38 ^b | 113.92±26.36 ^b | 208.68±57.23 ^a | 215.57±26.31 ^a |
| 2020/01/01 | 84.87±27.90 ^a | 86.31±21.45 ^a | 107.51±35.32 ^a | 95.28±20.33 ^a |
| 2020/01/03 | 87.29±26.60 ^a | 81.82±17.15 ^a | 87.78±31.30 ^a | 74.27±14.60 ^a |
| 2020/01/05 | 57.02±10.47 ^a | 58.06±9.46 ^a | 62.88±17.12 ^a | 57.15±20.57 ^a |
| 2020/01/07 | 56.86±18.81 ^a | 65.24±16.27 ^a | 80.50±23.10 ^a | 63.95±13.45 ^a |
| 2020/01/09 | 40.79±9.01 ^a | 39.47±5.59 ^a | 40.26±11.11 ^a | 41.96±10.43 ^a |
| 2020/01/11 | 44.91±16.53 ^a | 45.02±10.06 ^a | 59.76±23.57 ^a | 48.01±16.22 ^a |
| 2020/01/13 | 44.47±12.66 ^a | 39.69±5.20 ^a | 46.81±14.87 ^a | 45.96±16.57 ^a |
| 2020/01/15 | 45.72±16.85 ^a | 43.08±9.86 ^a | 56.41±23.35 ^a | 60.97±36.08 ^a |
| 2020/01/17 | 50.17±14.49 ^a | 46.48±15.08 ^a | 62.00±22.43 ^a | 57.98±34.65 ^a |
| 2020/01/19 | 55.04±16.27 ^a | 59.18±17.24 ^a | 91.51±41.33 ^a | 91.19±79.10 ^a |
| 2020/01/21 | 44.37±11.31 ^a | 45.21±11.93 ^a | 79.33±41.01 ^a | 74.73±65.19 ^a |

注: 同行中不同小写字母表示同一天的土壤 CO₂ 排放速率差异显著 ($P < 0.05$)。

表 6 CO₂ 排放速率与土壤温度相关系数及回归方程
Table 6 Correlation coefficient and regression equation between CO₂ emission rate and soil temperature

| 土层深度/cm | 方程 | R ² | 相关系数 R | Q ₁₀ |
|---------|-----------------------|----------------|---------|-----------------|
| 0 | $y = 3.387e^{0.12x}$ | 0.558 | 0.747** | 3.32 |
| 10 | $y = 2.913e^{0.128x}$ | 0.496 | 0.704** | 3.60 |
| 20 | $y = 2.892e^{0.13x}$ | 0.439 | 0.663** | 3.67 |

注: **表示 CO₂ 排放速率与土壤温度存在极显著相关 ($P < 0.01$)。

进一步分析覆盖期内不同时期 4 种覆盖模式的土壤 CO₂ 排放速率差异性, 结果如表 5。整个覆盖期内, 土壤 CO₂ 排放速率基本呈现模式 IV > 模式 III > 模式 II > 模式 I, 说明覆盖时增加枯饼施用量和谷壳层厚度可提高土壤 CO₂ 排放速率。不同覆盖模式间的显著性差异主要表现在覆盖后的第 3 和第 4 周, 特别是第 2 次覆盖后的 1 周内差异非常大, 且均表现为模式 IV 和模式 III 的土壤 CO₂ 排放速率显著高于模式 II 和模式 I, 而模式 II 和模式 I 之间及模式 IV 和模式 III 之间差异不显著。说明 15 与 18 t·hm⁻² 枯饼施用量之间的土壤 CO₂ 排放速率无显著差异, 40 cm 谷壳覆盖层的土壤 CO₂ 排放速率显著高于 30 cm 谷壳覆盖层的土壤 CO₂ 排放速率, 且差异主要表现在土壤 CO₂ 排放速率高的峰值区。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 二次覆盖措施对土壤温度有显著影响 目前在笋用林覆盖中增温材料主要有竹叶、谷壳、稻草、麦秆、有机肥等, 实行一性覆盖时, 覆盖材料不同, 增温效果不相同^[24-25]; 覆盖方式不同, 如仅覆盖发热物质^[26]、发热物质+保温层^[2]、发热物质+中层材料+保温层^[27]等, 增温效果也不一样。本研究表明, 同种增温材料因施用量不同, 增温效果也不同。

二次覆盖措施可显著提高土壤温度, 与一次覆盖模式的土壤温度呈现单峰型曲线动态变化不同^[2-3], 二次覆盖模式的土壤温度呈现双峰型动态变化曲线, 并且第 1 次覆盖后的土壤高温峰值低于一次覆盖模式, 而第 2 次覆盖后的土壤高温峰值高于一次覆盖模式, 20 °C 以上的土壤有效高温持续时间更长。原因是第 1 次覆盖时谷壳保温层较薄, 保温效果差, 枯饼分解释放的热量散失较快, 故高温峰值较低; 第 2 次覆盖时不但增加了枯饼量, 第 1 次和第 2 次施入的枯饼同时分解发热, 而且土壤温度比较高, 相关研究表明增温能够提高土壤酶的活性^[28], 影响土壤微生物群落, 促进枯饼分解放热, 并且新增加的 20

cm 谷壳层能有效阻止热量的散失, 所以, 第 2 次覆盖后, 土壤温度不但升温速度快, 而且高温峰值更高。

本试验结果表明, 二次覆盖措施可提高土壤有效积温, 延长土壤温度高于 20 °C 的时间, 有利于促进竹笋萌发, 提高竹笋产量和效益。4 种覆盖模式的土壤温度动态变化规律相似, 但不同覆盖模式的高温峰值及出现时间有差异。第 1 次覆盖随着谷壳保温层厚度的增加, 土壤温度高温峰值升高, 高温峰值出现时间推后; 第 2 次覆盖后, 随着谷壳保温层厚度的增加, 土壤高温峰值升高, 但高温峰值出现时间提前, 原因可能是谷壳层越厚, 土壤温度越高, 微生物活动能力更强, 分解枯饼速度越快。在枯饼施用量和谷壳层厚度 2 个覆盖因子中, 谷壳层厚度是影响土壤温度的首要因子, 这与程慧娟等^[2]的研究结果一致。40 cm 谷壳覆盖层的土壤温度显著高于 30 cm 谷壳覆盖层的土壤温度; 随着枯饼施用量的增加, 土壤高温峰值有所提高, 但 15 t·hm⁻² 与 18 t·hm⁻² 的枯饼施用量之间土壤高温峰值差异未达到显著水平。

3.1.2 二次覆盖措施可提高土壤 CO₂ 排放速率并改变其动态变化规律 有机物覆盖可增加土壤中 DOC (溶解性有机碳) 含量, 提高了土壤脲酶、酸性磷酸酶、蛋白酶和纤维素酶活性^[31], 为土壤微生物提供了大量碳源, 提高微生物的数量和活性^[32], 还能促进竹子根系和竹笋的代谢活动。所以, 土壤覆盖可直接影响土壤理化性质和土壤微生物群落而影响土壤 CO₂ 排放速率, 同时可通过提高土壤温度间接提高土壤 CO₂ 排放速率^[29-30]; 不同的覆盖处理, 对土壤养分及土壤酶活性的影响程度不同^[33], 对土壤 CO₂ 排放速率的影响程度不同。

笋用林二次覆盖措施不但增加了土壤养分, 还显著提高了土壤温度, 从而提高了土壤 CO₂ 排放速率, 平均排放速率是未覆盖林地的 4.24 ~ 6.23 倍, 并且改变了土壤 CO₂ 排放速率的动态变化规律。与一次覆盖模式相似, 呈单峰型曲线动态变化^[34], 但出现了明显的峰值区, 且峰值显著高于一次覆盖模式。4 种覆盖模式的峰值都出现在覆盖后的第 4 周, 并且有急速上升和下降过程。原因是第 1 次覆盖后, 土壤温度相对较低, 微生物分解枯饼速度较慢, 土壤 CO₂ 排放速率较低, 没有出现明显的土壤 CO₂ 排放峰值; 但第 2 次覆盖后, 因土壤温度升高, 促进第 1 次放入的枯饼分解, 增加了土壤有机质、全氮等土壤养分^[35], 提高了土壤微生物和酶的活性, 导致土壤 CO₂ 排放速率急速上升。但旺盛的微生物活动加快了枯饼的分解速度, 使未分解枯饼数量大量

减少, 土壤温度快速下降, 又导致土壤 CO₂ 排放速度出现快速下降现象。土壤 CO₂ 排放速率的峰值出现时间晚于土壤温度峰值出现时间, 原因可能是随着土壤温度的升高, 土壤微生物的种群和个体繁殖速度加快, 但种群和个体数量均达到最多需要有一定的累积时间。

本试验结果表明, 实施二次覆盖措施的平均土壤 CO₂ 排放量均高于 48.53 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 显著高于未实施覆盖措施的对照样地, 并且明显高于一次覆盖模式的土壤 CO₂ 排放速率。不同的覆盖模式, 因谷壳层厚度及发热物质枯饼的施用量不同, 增加的土壤养分和温度不同, 导致 CO₂ 排放速率不同, 表现为模式IV > 模式III > 模式II > 模式I。谷壳层厚度对土壤 CO₂ 排放速率的影响显著, 40 cm 谷壳层覆盖模式的土壤 CO₂ 排放速率显著高于 30 cm 谷壳层覆盖模式, 其差异主要出现在土壤 CO₂ 排放速率高的峰值区间。随着覆盖时枯饼施用量的增加, 土壤 CO₂ 的平均排放速率及峰值均会提高, 但 15 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与 18 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的枯饼施用量之间土壤 CO₂ 排放速率的差异性未达到显著程度。

3.1.3 土壤温度与土壤 CO₂ 排放速率存在显著的正相关性 解梦怡等^[15]研究发现, 25 °C 与 35 °C 条件下旱作玉米田的土壤平均呼吸速率比 15 °C 条件下分别增加了 17.0% 和 36.8%; 宋长春等^[23]也发现, 土壤温度对土壤 CO₂ 排放速率有显著影响。本试验表明, 在一定范围内, 土壤 CO₂ 排放速率与土壤温度之间的关系可用指数方程描述, 土壤 CO₂ 排放速率与 0、10 和 20 cm 土层温度的相系数分别为 0.747、0.704 和 0.663, 相关性均达到显著正相关水平。0、10 和 20 cm 3 个土层的温度可分别由解释 55.8%、49.6% 和 43.9% 的土壤 CO₂ 排放速率变异性 (表 6)。通过 3 个不同土层温度的指数回归分析, 可计算出不同土层的土壤呼吸的温度敏感性 (表 6)。表 6 中 Q₁₀ 为土壤呼吸随温度变化的程度, 即温度每升高 10 °C, 土壤呼吸增加的倍数^[36], Q₁₀ 值呈现 0 cm < 10 cm < 20 cm, 说明随着土壤深度增加, 土壤呼吸随温度的变化程度越大。

3.2 结论

厚竹笋用林冬季覆盖采用二次覆盖模式, 可显著提高土壤温度, 并延长高温持续时间, 有利于促进竹笋萌发并提高竹笋产量, 但同时也提高了土壤 CO₂ 的排放速率和排放量。实行二次覆盖模式时, 覆盖期内土壤温度呈双峰型曲线动态变化, 土壤 CO₂ 排放速率呈单峰型曲线动态变化。随着枯饼施用量的增加和谷壳覆盖层厚度的增厚, 土壤温度升

高, CO₂ 排放速率加快, 其中谷壳层厚度是影响土壤温度和 CO₂ 排放的主要因子, 40 cm 谷壳层的土壤温度和 CO₂ 排放速率显著高于 30 cm 谷壳层的覆盖模式, 15 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与 18 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的枯饼施用量之间的土壤温度和 CO₂ 排放速率差异不显著。土壤温度与土壤 CO₂ 排放速率之间存在显著正相关性。综合考虑增温及低碳排放效果, 二次覆盖模式以第 1 次覆盖施用枯饼 7.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、覆盖谷壳 10 cm 及第 2 次覆盖施用枯饼 10.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、覆盖谷壳 20 cm 的模式比较好。

参考文献:

- [1] 邵香君, 周菊敏, 王明芳, 等. 临安雷竹早出覆盖生产技术[J]. 中国蔬菜, 2018(11): 84-88.
- [2] 程慧娟, 申展, 陈怡君, 等. 枯饼、谷壳和水分对覆盖厚竹林土壤温度的影响[J]. 经济林研究, 2020, 38(4): 169-176.
- [3] 杨邦国, 申展, 沈学桂, 等. 雷竹林覆盖不同发热物质发热规律及对土壤温度的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(2): 89-96.
- [4] 王海霞, 彭九生, 程平, 等. 几种覆盖材料对雷竹林地土壤增温效果研究[J]. 世界竹藤通讯, 2015, 13(4): 9-12.
- [5] 孙志祥, 李敏, 韩上, 等. 有机肥部分替代化肥和秸秆还田对双季稻产量、养分吸收及土壤肥力的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(6): 1012-1016.
- [6] 黄界颖, 阮仁杰, 王擎运, 等. 不同耕作模式下秸秆还田对潮土肥力特征的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(4): 664-669.
- [7] 郭欣欣, 张蓉, 董禄信, 等. 不同秸秆覆盖量对土壤养分及马铃薯产量的影响[J]. 农业科技与信息, 2021(17): 52-56.
- [8] 魏宏磊. 冷凉地区不同地膜覆盖对玉米田土壤温度、养分和酶活性的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [9] 戴振建, 徐高, 姜训刚, 等. 不同覆盖方式对梨园土壤养分、净光合速率及产量的影响[J]. 果树资源学报, 2021, 2(5): 34-37.
- [10] 刘燕青, 王计磊, 李子忠. 秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 429-436.
- [11] 王波, 李琴, 朱炜, 等. 毛竹林覆盖经营对土壤养分含量、酶活性及微生物生物量的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(1): 110-118.
- [12] 蔡雪梅. 黄土高原雨养区苜蓿种植年限影响土壤碳排放的微生物驱动机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [13] 尹春梅, 谢小立, 王凯荣. 稻草覆盖对冬闲稻田二氧化碳通量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 115-119.
- [14] 官情, 王俊, 宋淑亚, 等. 黄土旱塬区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1471-1476.

- [15] 解梦怡, 商雨晴, 赵发珠, 等. 不同覆盖方式下旱作玉米田土壤呼吸对温度变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 467-473.
- [16] FU X, WANG J, XIE M Y, et al. Increasing temperature can modify the effect of straw mulching on soil C fractions, soil respiration, and microbial community composition[J]. PLoS One, 2020, 15(8): e0237245.
- [17] WANG H M, ZHENG J, FAN J L, et al. Grain yield and greenhouse gas emissions from maize and wheat fields under plastic film and straw mulching: a meta-analysis[J]. Field Crops Res, 2021, 270: 108210.
- [18] 商雨晴, 解梦怡, 王俊, 等. 不同覆盖措施下旱作玉米田土壤呼吸对氮添加的响应[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(5): 711-719.
- [19] 沈学桂, 申展, 杨邦国, 等. 覆盖雷竹林土壤高温胁迫对竹笋萌发和笋体大小的影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(5): 1013-1021.
- [20] 黎祖尧, 李晓霞. 厚竹种质性状与生理活性研究综述[J]. 经济林研究, 2013, 31(2): 167-170.
- [21] 陈阿丽, 赵婉琪, 阮羽清, 等. 厚竹出退笋规律及退笋过程中营养成分的变化[J]. 林业科学, 2019, 55(12): 32-40.
- [22] 李苑, 张艳华, 黎祖尧, 等. 厚竹笋营养的地域变异及对生长环境的响应[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(1): 64-69.
- [23] 宋长春, 王毅勇. 湿地生态系统土壤温度对气温的响应特征及对 CO₂ 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 4625-4629.
- [24] 余远国, 江雄波, 肖创伟, 等. 雷竹覆盖栽培技术[J]. 经济林研究, 2013, 31(4): 198-202.
- [25] 张有珍, 何钧潮, 郑惠君. 肥料种类及施肥深度对覆盖雷竹林的影响[J]. 浙江林业科技, 2011, 31(3): 40-43.
- [26] 丁胜华, 谷战英, 陈建华, 等. 不同地表覆盖对地温及竹笋生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(3): 58-60.
- [27] 陈洪, 简霁, 杨东生, 等. 不同覆盖模式对毛竹林出笋的影响[J]. 四川林业科技, 2019, 40(1): 43-47.
- [28] 杨玉莲. 模拟增温对高山森林土壤微生物和酶活性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [29] 任万军, 黄云, 吴锦秀, 等. 免耕与秸秆高留茬还田对抛秧稻田土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2913-2918.
- [30] 王宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 等. 不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 125-133.
- [31] 吴静, 陈书涛, 胡正华, 等. 不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1497-1506.
- [32] 李键, 刘鑫铭, 姚成硕, 等. 武夷山国家公园不同林地土壤呼吸动态变化及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3588-3602.
- [33] 刘长源, 焦凤丽, 洪圣哲, 等. 不同覆盖处理对土壤酶活性和土壤养分的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(S1): 246-252.
- [34] 杨飞强, 周泽敏, 申展, 等. 林地覆盖对雷竹林土壤 CO₂ 排放速率的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(6): 75-84.
- [35] 朱利霞, 曹萌萌, 桑成琛, 等. 生物有机肥替代化肥对玉米土壤肥力及酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(1): 67-72.
- [36] DAVIDSON E A, JANSSENS I A, LUO Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀[J]. Glob Change Biol, 2006, 12(2): 154-164.