

张昂, 董云萍, 林兴军, 等. 咖啡废弃物覆盖对咖啡光合特性与碳水利用效率的影响 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (X): 1-9.
ZHANG A, DONG Y P, LIN X J, et al. Effects of coffee waste mulching on photosynthesis and water use efficiency of coffee seedlings [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (X): 1-9.

咖啡废弃物覆盖对咖啡光合特性与碳水利用效率的影响

张 昂¹, 董云萍^{1,2}, 林兴军¹, 赵青云¹, 孙 燕¹, 龙宇宙¹, 钟壹鸣³, 谭 军^{1*}

(1. 中国热带农业科学院香料饮料研究所/农业农村部香辛饮料作物遗传资源利用重点实验室/海南省热带香辛饮料作物遗传改良与品质调控重点实验室, 海南, 万宁, 571533; 2. 云南省董云萍专家工作站, 云南, 普洱, 665099; 3. 热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室/海南大学 林学院&热带作物学院, 海南, 海口, 570228)

摘 要:【目的】探究不同咖啡枯落物与果皮等废弃物覆盖对咖啡幼苗生长与光合的影响, 为咖啡废弃物资源化利用和咖啡生产过程节本增效提供论基础。【方法】以1年生咖啡幼苗为试验材料, 采用随机区组设计, 设置对照(C)、咖啡枯落物覆盖(L)、果皮覆盖(P)以及枯落物与果皮混合覆盖(LP)4个盆栽试验处理, 探究不同覆盖措施对咖啡叶片光合特性与碳水利用效率的影响。【结果】咖啡枯落物覆盖显著提高咖啡比叶面积45.46%, 却不影响土壤微环境以及植株叶片光合速率等指标; 咖啡果皮覆盖显著降低咖啡株高12.11%, 并且通过降低土壤温度以及提高土壤速效钾含量显著提升咖啡叶片净光合速率78.33%、呼吸速率109.34%、总光合速率91.72%、净水分利用效率80.54%以及总水分利用效率104.95%, 但是咖啡果皮覆盖对咖啡叶片气孔导度、蒸腾速率、碳利用效率等光合指标的影响较小; 不同咖啡废弃物覆盖下的咖啡叶片光合能力综合评价为P>LP>L>C。【结论】咖啡果皮单独覆盖下咖啡幼苗的生长以及其光合能力高于其他处理。咖啡果皮废弃物覆盖有助于促进咖啡植株健康生长以及咖啡生产环节的节本增效。

关键词: 保护性耕作; 咖啡果皮; 咖啡枯落物; 光合速率; 水分利用效率; 碳利用效率

中图分类号: S 344.9

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 00-0001-09

Effects of coffee waste mulching on photosynthesis and water use efficiency of coffee seedlings

ZHANG Ang¹, DONG Yunping^{1,2}, LIN Xingjun¹, ZHAO Qingyun¹, SUN Yan¹, LONG Yuzhou¹, ZHONG Yiming³, TAN Jun^{1*}

(1. *Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Genetic Resources Utilization of Spice and Beverage Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Hainan Provincial Key Laboratory of Genetic Improvement and Quality Regulation for Tropical Spice and Beverage Crops, Wanning, 571533, China*; 2. *Yunnan Province Dong Yunping Expert Workstation, Pu'er, 665099, China*; 3. *Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education, College of Forestry & College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, 570228, China*)

Abstract: 【Objective】The effects of coffee peel and litter on the growth and photosynthesis of coffee seedlings were investigated to determine a suitable ecological cycle cultivation a suitable of coffee. 【Method】One-year-old seedlings of seedlings were used as experimental materials. A randomized block design was used to study the effects of coffee peel and litter on their leaf photosynthesis and water use efficiency. Conventional mulching group was set up: C (control), L (litter mulching cultivation), P (peel mulching cultivation) and LP (litter and peel mulching cultivation). 【Result】Coffee litter mulching significantly increased the specific leaf area of coffee by 45.46%, while coffee peel mulching significantly decreased the plant height by 12.11%. Coffee peel mulching significantly increased net photosynthesis, leaf respiration, total photosynthesis, net water use efficiency and total water use efficiency by 78.33%, 109.34%, 91.72%, 80.54% and 104.95%, but

收稿日期: 2021-10-27 初稿; 2022-03-29 修改稿

作者简介: 张昂 (1991-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 作物高效栽培研究 (E-mail: angzhang_henu@163.com)

* 通信作者: 谭军 (1985-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 栽培和连作障碍研究。E-mail: 649766283@qq.com

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目 (321QN327); 国家自然科学基金项目 (31901469)

did not affect stomatal conductance, transpiration rate and carbon use efficiency. The comprehensive evaluation of coffee photosynthesis under coffee waste mulching treatment was $P > LP > L > C$. 【Conclusion】 Coffee peel mulching was better than other mulching treatments in promoting the growth and photosynthetic capacity of coffee seedlings. The suitable coffee ecological cycle cultivation with the peel amount of 239.05 g m^{-2} could to realize cost saving and efficiency increase in coffee planting process.

Key words: Conservation tillage; Coffee peel; Coffee litter; Photosynthetic rate; Water use efficiency; Carbon use efficiency

0 引言

【研究意义】咖啡作为云南与海南等南方省区重要的特色经济作物之一,大力发展咖啡产业对巩固脱贫攻坚成果及促进乡村振兴战略意义重大^[1]。国内外咖啡传统栽培技术以覆盖耕作方式为主,即在咖啡树盘处通过覆盖秸秆、椰糠或枯枝落叶等农业废弃物,改善咖啡根际土壤微环境,提高咖啡幼苗成活率,提升咖啡产量及品质,增加经济效益^[2]。然而随着咖啡种植年限的增加以及相关产业规模的扩大,传统咖啡栽培技术难于适应产业发展需求:一方面,农业覆盖材料价格的持续上涨直接提高咖啡种植成本,并且化肥农药在土壤中的累积严重威胁咖啡土壤生物健康,加剧咖啡园早衰减产现象;另一方面,咖啡初加工过程中的咖啡果皮副产物,大部分未经处理被直接丢弃,造成大量资源的浪费^[3]。因此使用咖啡枯落物与果皮替代传统覆盖物,既促进咖啡枯落物与果皮的资源化利用,又减少覆盖物等投入品使用量,降低咖啡种植成本。【前人研究进展】农业废弃物作为养分的基本载体,在养分循环中是连接植物与土壤的“纽带”,在促进农田生态系统正常的物质循环和养分平衡方面有着特别重要的作用^[4]。前期研究已证实咖啡枯落物与果皮等废弃物中含有丰富的氮、磷、钾元素,是制作优质有机肥的潜在材料^[3],将咖啡果皮等废弃物还田分解不仅显著提升土壤养分含量,还能够改善土壤质地、提高土壤水分含量^[5]。然而目前咖啡废弃物覆盖对咖啡生理机制尤其是光合特性的影响却尚不明确。一般认为作物光合作用除受光照^[5,6]、温度^[7,8]等因子影响较大外,土壤水分含量和养分含量的影响也是一个不可忽略的因素^[9]。研究表明,一方面,叶片接受光照后会打开气孔,开始扩散水汽,引起叶片水势下降,降低光合作用^[10]。土壤含水量的变化是影响咖啡叶片水势的主要因素^[11];另一方面,矿质元素 N 对植物光合速率有明显的促进作用^[12],并且磷和钾等元素不仅促进了叶绿素的合成,而且使叶片把所捕获的光能较充分地用于光合作用,提高了叶片的光合速率^[13,14]。但是,作物枯枝落叶等废弃物分解过程中释放的化感物质对植物叶片的光合速率等

指标也具有一定的抑制作用^[15],因此咖啡废弃物覆盖对咖啡叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等指标的影响目前尚未可知。此外,叶片碳利用效率(Carbon use efficiency, *CUE*)作为叶片碳平衡的重要指标,是光合与呼吸作用综合作用的结果,反映了咖啡碳同化能力^[16],而作物水分利用效率(Water use efficiency, *WUE*)表征吸收单位质量的碳所消耗的水分,是衡量作物抗旱性的一个重要指标^[17]。由于环境因子对咖啡叶片光合、呼吸和蒸腾的影响机制不同,环境因子与叶片碳水利用效率之间的相关关系复杂而多变^[18-20],例如降水^[21]、温度^[22]、光照^[23]和土壤养分^[24]等指标均会显著改变 *CUE* 和 *WUE* 值的大小。因此,咖啡枯落物与果皮等废弃物覆盖对咖啡叶片光合指标的影响仍需进一步探究。【本研究切入点】通过明确咖啡枯落物与果皮等废弃物覆盖下土壤微环境与咖啡叶片光合指标之间的显著差异,探究不同咖啡废弃物覆盖对咖啡叶片光合能力和碳水耦合过程的其关键驱动因子。【拟解决的关键问题】探究咖啡果皮及枯落物覆盖对咖啡幼苗植株的光合速率及其碳水利用效率的影响和调控机制,为咖啡植株健康生长及其生产过程的节本增效提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究采用中粒种咖啡热研 1 号(Coffea Canephora Pierre ex Froehner cv. Reyan No.1)。咖啡育苗采用常规沙床催芽:将咖啡种子置于 50% 荫蔽度的日光温室中培育,待其长至 4 对真叶时,选取长势一致的植株,移栽至直径 30 cm 厘米的花盆中。咖啡枯落物收集于中国热带农业科学院香料饮料研究所(香饮所)咖啡种质资源圃;咖啡果皮收集于海南兴隆华侨农场太阳河咖啡加工厂(该工厂使用的咖啡品种以中粒种咖啡为主,与实验品种相同)。

1.2 试验方法

咖啡盆栽试验在 2020 年 6 月开展于香饮所种质资源圃基地(北纬 $18^{\circ}74'$,东经 $110^{\circ}20'$)。试验采用完全随机区组设计,包括未覆盖咖啡废弃物(C)、覆盖咖啡枯落物(L)、覆盖咖啡果皮(P)和同时

覆盖咖啡枯落物和果皮（LP）等四种覆盖处理，每个区组内设置 3 个盆栽，每个处理重复 6 次，共 72 盆。作者前期随机调查海南 6 个咖啡种植园现存咖啡枯落物和果皮的累积量分别为 301.39 和 239.05 g m⁻²。本试验采取等量添加原则，分别在 L 和 P 处理花盆中添加 85.22 和 67.59 g 咖啡枯落物和果皮，在 LP 处理中同时添加上述量的混合枯落物与果皮。所有盆栽咖啡苗采用相同的水肥处理，每个季度测定 1 次土壤与咖啡生长指标，1 年后进行破坏性取样。指标测定过程如下：

生长指标：用米尺测定植株株高；叶片采集后及时测定叶面积，而后置于 105 ℃ 杀青 1 h，75 ℃ 烘干 48 h，称重。比叶面积（SLA）= 叶干重/叶面积。光合指标的获取是在晴天上午 10:00~11:00，选取茎干自下而上第 4 层叶，利用 Li-6400XT 便携式光合仪测定植株净光合速率（ P_n ）、叶片呼吸（ R ）、气孔导度（ G_s ）、胞间 CO₂ 浓度（ C_i ）、蒸腾速率（ T_r ）等光合指标、并计算植株总光合速率（ P_g ）、碳利用效率（ CUE ）和水分利用效率（ WUE ），计算公式为 $P_g = P_n + R$ ， $CUE = P_n / P_g$ ， $WUE_n = P_n / T_r$ ， $WUE_g = P_g / T_r$ ^[16, 17]。每株测定 3 个叶片，共测定 72 片叶。叶绿素含量是利用 SPAD-502plus 型叶绿素计，在测定光合指标的同时，测定相同位叶的叶绿素相对含量（SPAD）。

1.3 数据处理

数据统计分析采用 SAS V8 软件进行双因素方差

分析，以枯落物覆盖和咖啡果皮覆盖为两个固定因素，比较土壤理化性质指标、植株生理指标及叶片光合指标在不同处理内和处理间分别是否存在显著差异；使用 CANOCO 4.5 进行冗余分析（RDA），以探究影响咖啡光合指标的主要环境因子，运算过程中使用具有 499 个排列的蒙特卡罗测试来确定环境变量参数的显著性；Spearman 等级相关性分析用于测试植株生理指标与土壤理化性质之间的关联性。运用隶属函数法对各光合和植株性状指标进行综合分析，计算出不同覆盖处理在各指标内的隶属度值，进而综合判定咖啡植株性状。隶属函数计算公式如下：

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$
 ^[24]

式中：U（X_i）为隶属函数值，且 U（X_i）∈[0, 1]，X_i 为某个光合指标测定值，X_{max}、X_{min} 分别为该指标测定值内最大值和最小值。

使用 Origin 9.8 和 R 4.0.3 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 咖啡废弃物覆盖对土壤微环境及理化性质的影响

本研究中咖啡枯落物覆盖与果皮覆盖分别显著降低土壤温度 0.42 ℃（ $F = 6.66$ ， $P < 0.05$ ）和 0.33 ℃（ $F = 10.40$ ， $P < 0.01$ ，表 1，2），但两者对土壤温度的影响不存在交互效应（表 2）；果皮覆盖显著提高土壤速效钾含量 46.28%（ $F = 4.70$ ， $P < 0.05$ ），枯

表 1 不同覆盖模式对土壤微环境及理化性质的影响
Table 1 The effect of different mulching patterns on soil microclimate, physical and chemical properties

种植方式	含水量 SM/%	温度 ST/℃	酸碱度 pH	容重 SBD/N m ⁻³	有机质 SOM/g kg ⁻¹	速效钾 SAK/mg kg ⁻¹	速效磷 SOP/mg kg ⁻¹	碱解氮 SAN/mg kg ⁻¹
C	8.20±0.86	27.55±0.06	5.65±0.32	1.59±0.08	21.99±1.56	36.28±5.66	29.64±6.90	86.72±1041
L	8.33±0.88	27.33±0.05	5.57±0.30	1.61±0.10	22.10±2.77	46.42±4.78	27.74±4.81	90.84±13.97
P	7.26±0.62	27.28±0.07	5.55±0.18	1.57±0.09	21.33±3.36	33.01±7.86	28.09±8.50	91.70±17.45
P×L	8.53±1.23	27.18±0.07	5.76±0.23	1.60±0.09	21.28±2.84	54.93±10.10	33.48±9.76	90.15±13.32

注:表中数据为平均值±标准误差。
Note: The data is mean ± standard errors.

表 2 不同覆盖模式对土壤微环境及理化性质的双因素方差分析结果（F 值）
Table 2 Results of two-way ANOVA on s microclimate, physical and chemical properties under different mulching patterns (F value)

种植方式	含水量 SM/%	温度 ST/℃	酸碱度 pH	容重 SBD/N m ⁻³	有机质 SOM/g kg ⁻¹	速效钾 SAK/mg kg ⁻¹	速效磷 SOP/mg kg ⁻¹	碱解氮SAN/mg kg ⁻¹
P	0.16	10.40**	0.07	0.08	0.00	0.13	0.05	0.01
L	0.58	6.66*	0.02	0.05	0.07	4.70*	0.07	0.02
P×L	0.38	0.82	0.31	0.00	0.00	0.64	0.22	0.04

注:表中“*”表示 $P < 0.05$ ，“**”表示 $P < 0.01$ 。
Note: “*” represent $P < 0.05$, “**” represent $P < 0.01$.

落物覆盖却不影响速效钾含量, 且两个处理在速效钾含量的影响不存在交互效应。上述两个处理不影响土壤水分、pH、容重、有机质含量、速效磷和碱解氮含量, 且在各个指标的影响不存在交互作用。

2.2 咖啡废弃物覆盖对咖啡植株性状的影响

咖啡枯落物覆盖显著提高咖啡比叶面积 45.46% ($F=6.83$, $P<0.05$), 而咖啡果皮覆盖不影响比叶

面积, 且两个处理对土壤温度的影响不存在交互效应 (图 1a); 咖啡果皮覆盖显著降低咖啡株高 12.11% ($F=6.39$, $P<0.05$), 枯落物覆盖却不影响株高, 且两个处理对咖啡株高的影响不存在交互效应 (图 1c)。咖啡废弃物处理不影响咖啡叶面积指数和叶绿素相对含量, 且对上述两个指标的影响不存在交互作用 (图 1b, d)。

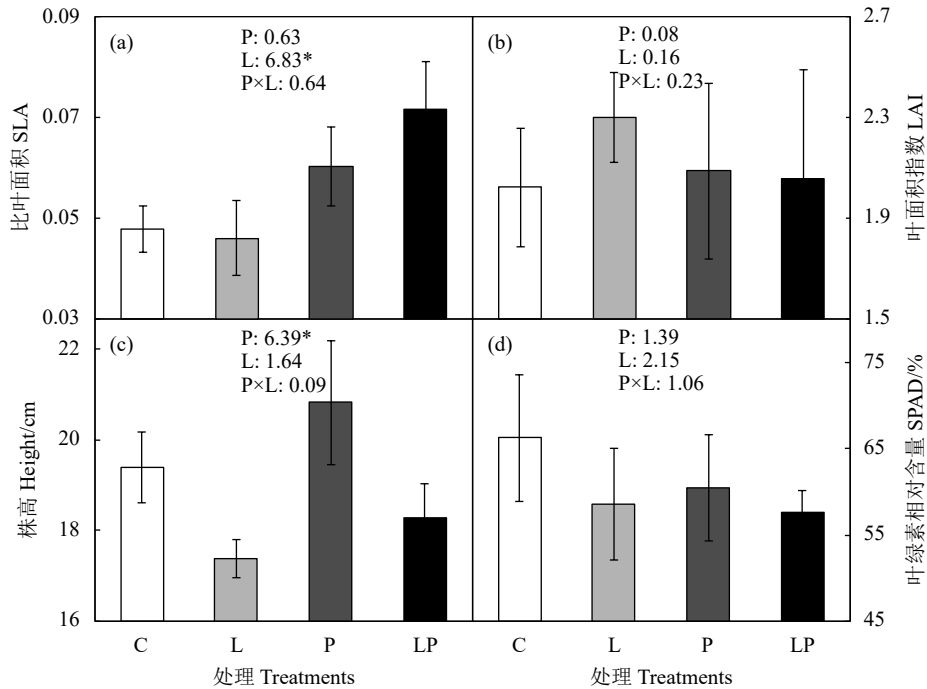


图 1 不同覆盖模式对咖啡植株生理指标的影响

Fig. 1 Effects of different mulching patterns on physiological indexes of coffee plants

2.3 咖啡废弃物覆盖对咖啡植株光合指标的影响

咖啡枯落物覆盖与果皮覆盖不影响气孔导度、蒸腾速率、碳利用效率, 却对气孔导度 ($F=8.89$, $P<0.01$)、蒸腾速率 ($F=7.27$, $P<0.01$)、碳利用效率 ($F=5.19$, $P<0.05$) 的影响存在交互作用 (图 2a, b, f)。咖啡果皮覆盖显著提高咖啡净光合速率 78.33% ($F=8.89$, $P<0.05$)、叶片呼吸 109.34% ($F=7.11$, $P<0.01$)、总光合速率 91.72% ($F=10.19$, $P<0.001$)、净水分利用效率 80.54% ($F=9.99$, $P<0.01$) 和总水分利用效率 104.95% ($F=4.50$, $P<0.05$), 而咖啡枯落物覆盖不影响上述指标, 且两个处理对上述指标的影响不存在交互效应 (图 2)。

2.4 咖啡光合指标与环境因子和咖啡性状相关性分析

采用冗余分析 (RDA) 进一步分析各咖啡光合生理指标与环境因子之间的关系 (图 3)。蒙特卡洛置换检验表明 (表 3), 土壤温度 ($F=4.2$, $P=0.01$) 对咖啡光合生理指标的影响达到显著, 速效钾 ($F=$

1.7, $P=0.06$) 和叶绿素相对含量 ($F=1.6$, $P=0.09$) 对咖啡光合生理指标的影响达到边际显著, 所有的环境变量共同解释了样本间光合指标变异的 56.7%, 影响大小顺序为 ST>SAK>SPAD>Height>SM>pH>SOM>SLA>LAI>SBD>SAN>SOP。RDA 的前两个排序轴分别解释总方差 40.26% 和 11.13%。

Spearman 等级相关分析表明总光合速率 ($P<0.05$)、净光合速率 ($P<0.05$)、总水分利用效率 ($P<0.01$)、净水分利用效率 ($P<0.05$) 和 ST 呈显著负相关; 蒸腾速率、总光合速率与土壤速效钾含量之间存在显著正相关关系 ($P<0.05$); 气孔导度与叶片相对叶绿素含量之间存在显著负相关关系 ($P<0.01$); 由此可知土壤温度和速效钾等养分含量是调控咖啡光合速率等生理指标的主要环境因素 (图 4)。

2.5 咖啡废弃物覆盖对咖啡光合生理指标影响综合评价

计算出各覆盖处理组在各指标内的隶属度值, 进而综合判定咖啡植株生理状态的优劣。由表 4 可

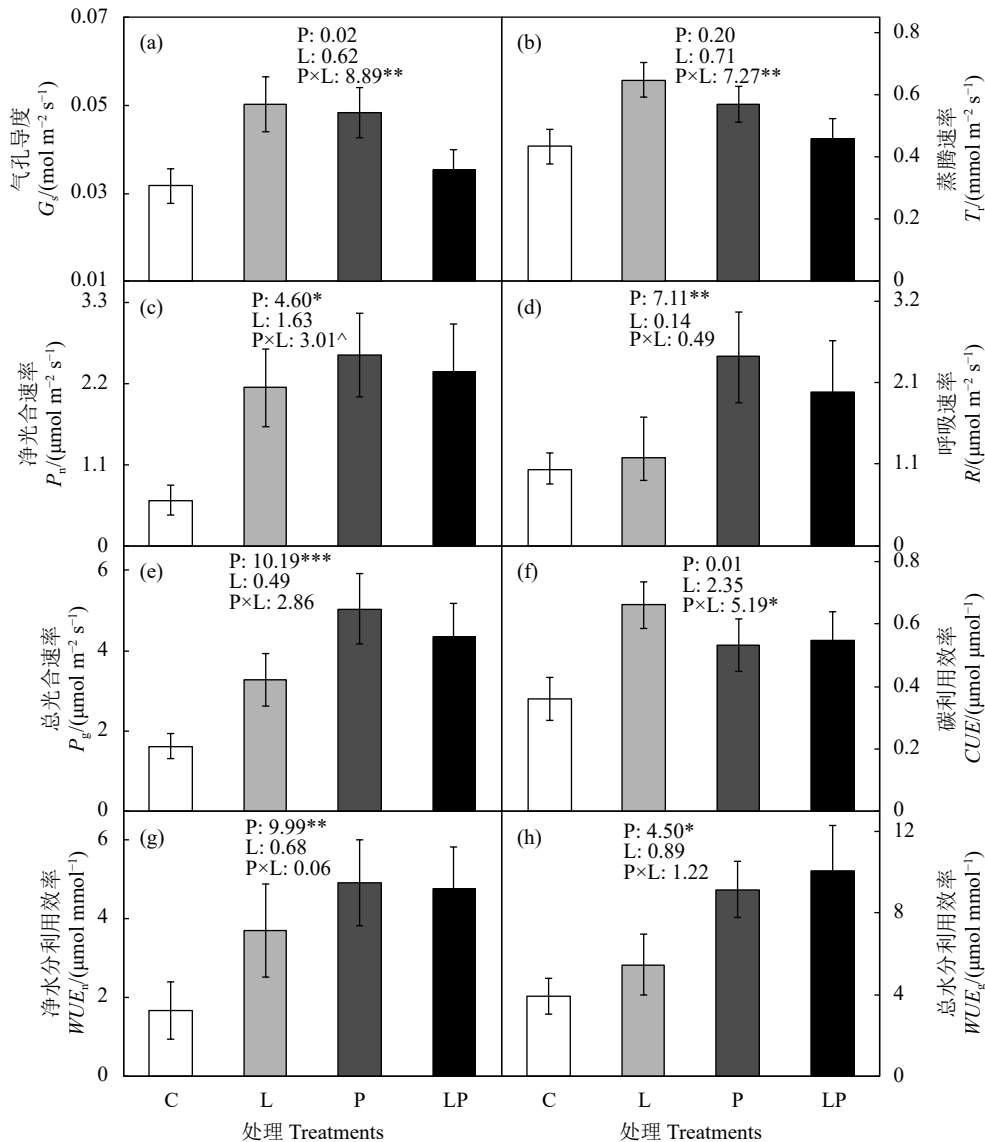


图 2 不同覆盖模式对咖啡光合指标的影响

Fig. 2 Effects of different mulching patterns on photosynthetic indexes of coffee plants

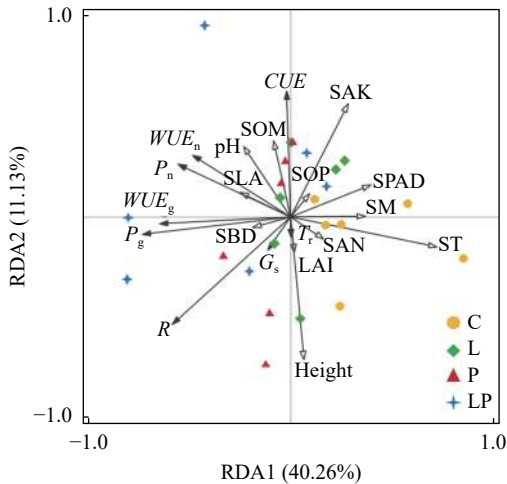


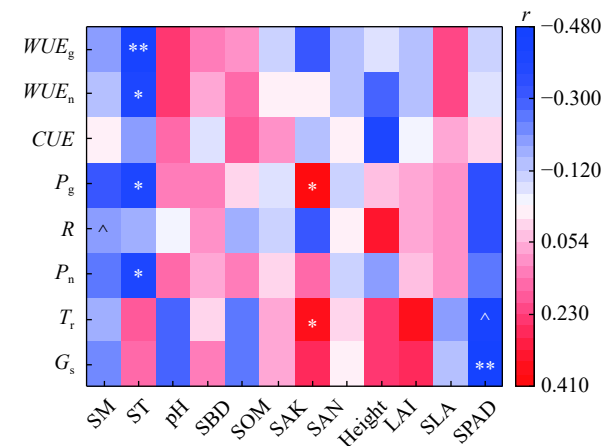
图 3 咖啡光合生理指标与环境及性状因子的冗余分析 (RDA)

Fig. 3 Redundant analysis (RDA) of coffee photosynthetic indexes, microclimate and coffee physiological indexes

表 3 环境与性状对咖啡光合生理指标的贡献及其显著性

Table 3 The contributions and significances of environmental variables to soil microbial community compositions

环境与咖啡性状 Environment and coffee properties	贡献率% Contribution rate%	F值	P值
土壤温度/ST	16	4.2	0.01
速效钾含量/SAK	7.3	1.7	0.06
叶绿素相对含量/SPAD	6.7	1.6	0.09
株高/Height	6.0	1.4	0.11
土壤湿度/SM	4.5	1.0	0.37
酸碱度/pH	3.6	0.8	0.45
有机质含量/SOM	2.2	0.5	0.6
比叶面积/SLA	2.4	0.5	0.62
叶面积指数/LAI	1.6	0.3	0.75
容重/SBD	1.1	0.3	0.84
碱解氮含量/SAN	1.0	0.2	0.87
速效磷含量/SOP	0.5	0.1	0.92



注:图中“^”表示 $P < 0.1$, “*”表示 $P < 0.05$, “**”表示 $P < 0.01$ 。
Note: “^” represent $P < 0.1$, “*” represent $P < 0.05$, “**” represent $P < 0.01$.

图 4 不同咖啡废弃物覆盖下咖啡光合指标与环境因子和植株性状相关性分析
Fig. 4 Correlation analysis of coffee photosynthetic indexes, microclimate and plant traits indexes under different mulching patterns

知,不同覆盖处理的平均隶属值排序从大到小为 $P > LP > L > C$,排名最高的是咖啡果皮覆盖处理,未覆盖咖啡废弃物处理得分最低(表 4)。

3 讨论

3.1 咖啡废弃物覆盖对土壤微环境的影响

农业废弃物作为养分的基本载体,在促进农田生态系统物质循环和养分平衡方面,维持土壤肥力方面具有重要作用^[25, 26]。前期大量研究已证实土壤氮、磷和钾等养分含量随凋落物累积量的增加而显著提高^[27, 28],但是本研究结果表明咖啡果皮与枯落物覆盖对土壤速效氮和磷的影响较小,与前期研究

结果不一致,可能与咖啡废弃物质量有关^[29]。农业废弃物质量包括易分解成分(如氮和磷化合物)和难分解成分(如木质素、纤维素和多酚类物质等)^[30],在长达一年的分解过程中,氮和磷等化合物在前期短暂快速分解阶段释放,导致后期难分解成分在长期裂解过程中释放氮和磷元素不足^[31]。值得注意的是,咖啡果皮覆盖显著提高土壤速效钾含量,可能与咖啡果皮中钾元素含量显著高于植株其他器官有关^[5]。此外,前期的凋落物倍增实验均证实凋落物覆盖能够显著提高土壤含水量并降低土壤温度^[32]。本研究的土壤温度结果与前期研究保持一致,即两种咖啡废弃物覆盖显著降低土壤温度。然而,咖啡土壤水分却不响应于废弃物覆盖处理,可能与开展盆栽试验温室的高空气湿度有关。有研究表明,农田生态系统水分散失方式主要是植物蒸腾作用^[33],由于空气湿度与叶片水势之间存在正相关关系^[34],温室中较高的空气湿度可能是引起咖啡蒸腾速率不响应于咖啡废弃物覆盖处理的原因之一^[35, 36]。因此,在本实验的持续高土壤水分条件下,咖啡废弃物的保水功能被弱化。

3.2 咖啡废弃物覆盖对咖啡光合速率的影响

前期研究发现影响咖啡光合速率的主要因子是土壤养分、光照强度和土壤温湿度等环境条件^[37-39]。本研究表明咖啡枯落物覆盖处理下光合速率的变化主要受土壤温度和土壤钾含量的调控。一方面,咖啡适宜的生长温度为 22.0-28.4 ℃,同时咖啡属于浅根系植物,其对土壤温度的变化较为敏感^[40]。有研究指出当土壤温度高于植物适宜光合温度,会通过抑制植株根系或叶片酶活性,进而抑制其光合速率^[41-43],因此本研究中咖啡果皮覆盖能够通过降低

表 4 咖啡废弃物覆盖对咖啡光合生理指标影响综合评价
Table 4 Comprehensive evaluation of effects coffee waste cover on coffee photosynthetic indexes

处理 Treatment	株高 Height	叶面积指数 LAI	比叶面积 SLA	叶绿素含量 SPAD	气孔导度 G_s	蒸腾速率 T_r	净光合速率 P_n	呼吸速率 R
C	0.59	0.00	0.07	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L	0.00	1.00	0.00	0.11	1.00	1.00	0.77	0.10
P	1.00	0.24	0.56	0.32	0.90	0.63	1.00	1.00
LP	0.26	0.13	1.00	0.00	0.19	0.11	0.88	0.68

处理 Treatment	总光合速率 P_g	碳利用效率 CUE	净水分利用效率 WUE_n	总水分利用效率 WUE_g	隶属度平均值 Average membership	排名 Ranking
C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	4
L	0.49	1.00	0.62	0.25	0.53	3
P	1.00	0.57	1.00	0.85	0.76	1
LP	0.80	0.62	0.95	1.00	0.55	2

土壤温度进而促进光合速率。另一方面，叶片钾元素能够通过改善叶肉细胞光合活性，提高净光合速率^[44, 45]。咖啡果皮覆盖通过提高土壤钾的供应，进而促进叶片总光合速率的提升。

3.3 咖啡废弃物覆盖对咖啡碳水分利用效率的影响

植物的水分利用效率 *WUE* 反映的是植物由于蒸腾消耗的单位水量所能产生的光合产量。前期研究表明凋落物覆盖降低热带木本植物叶片 *WUE*，是由于温度升高会导致植物的蒸腾速率加快从而使植物 *WUE* 降低^[17, 46]，导致植物 *WUE* 与温度呈显著负相关关系。而本研究结果与上述研究并不一致，原因在于咖啡果皮覆盖通过降低土壤温度促进光合速率的提升，而咖啡蒸腾速率对咖啡废弃物覆盖处理并不敏感，导致咖啡果皮覆盖下咖啡叶片在维持蒸腾速率稳定的基础上显著促进碳吸收速率，进而提高叶片 *WUE*。本研究中土壤速效钾含量与蒸腾速率之间存在显著正相关关系，表明钾元素是加速咖啡植株水汽通量的主要驱动因子之一^[47]。尽管咖啡果皮覆盖显著提高土壤速效钾含量，但咖啡蒸腾速率可能收到其他因素的干扰，其具体调控机制仍需进一步研究。

温度作为影响树木 *CUE* 最重要的气候因子，已得到广泛的关注^[21, 48, 49]。前期有研究认为光合和呼吸随温度变化具有不同的敏感性，从而导致温度变化对 *CUE* 的影响存在显著差异^[50]。但在本研究中碳利用效率并不响应于土壤温度的变化是由于咖啡果皮覆盖通过降低土壤温度显著提高净光合速率，但同时也显著促进呼吸速率的提高，因此对叶片瞬时碳利用效率并没有影响。上述结果可能与咖啡对温度长期变化的自适应有关^[51, 52]，即咖啡叶片随温度的变化，光合速率和呼吸速率会保持一个相对恒定的比值，从而恢复光合与呼吸两者之间的平衡^[53]。因此不同咖啡废弃物覆盖均未改变咖啡叶片碳利用效率。

3.4 对不同废弃物覆盖下咖啡光合生理的综合性评价

单个光合指标只反映咖啡植株光合特性的某个侧面，而咖啡植株各部分的协调和平衡共同决定了咖啡的光合作用过程。本研究根据不同光合与生理指标的隶属度值，对植株的生长状态进行综合评价，其数值越高表明咖啡光合与长势越好。结果显示，单独覆盖咖啡果皮处理中咖啡植株光合指标数值最高，其与对应的株高等生长指标相符合，即为最适的咖啡废弃物覆盖处理。然而本研究中咖啡废弃物的使用量固定不变，并未考察不同量的咖啡废弃物覆盖对咖啡植株生理过程的影响。在未来的研

究中，应探讨不同重量咖啡果皮与枯落物对咖啡光合指标的覆盖组合，用于获得更加科学的覆盖方案。

4 结论

咖啡果皮覆盖通过降低土壤温度以及提高土壤速效钾含量显著提高咖啡净光合速率、叶片呼吸、总光合速率、净水分利用效率和总水分利用效率，而咖啡枯落物覆盖却不影响光合指标。经综合评价，仅使用咖啡果皮覆盖对咖啡光合指标的促进效果优于其他覆盖措施。在进行咖啡栽培实践中，使用果皮废弃物覆盖最有助于促进咖啡植株健康生长以及咖啡生产的节本增效。

参考文献：

- [1] 张明达, 王睿芳, 李艺, 等. 云南省小粒咖啡种植生态适宜性区划 [J]. 中国生态农业学报, 2020, 28 (2): 168–178.
ZHANG M D, WANG R F, LI Y, et al. Ecological suitability zoning of *Coffea arabica* L. in Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28 (2): 168–178. (in Chinese)
- [2] GOMES L C, BIANCHI F J J A, CARDOSO I M, et al. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 294: 106858.
- [3] 赵青云, 普浩杰, 王秋晶, 等. 咖啡果皮不同堆沤处理养分含量及其对咖啡植株生长的影响 [J]. 热带作物学报, 2020, 41 (4): 633–639.
ZHAO Q Y, PU H J, WANG Q J, et al. Nutrient content of coffee peel with different composting treatments and its effects on coffee plant growth [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41 (4): 633–639. (in Chinese)
- [4] BERG B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133 (1/2): 13–22.
- [5] 赵青云, 邢诒彰, 林兴军, 等. 施用咖啡果皮对咖啡幼苗生长及土壤理化性状的影响 [J]. 热带农业科学, 2017, 37 (8): 54–59.
ZHAO Q Y, XING Y Z, LIN X J, et al. Effects of coffee fruit peel application on coffee seedlings growth and soil physiochemical characteristics [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2017, 37 (8): 54–59. (in Chinese)
- [6] BABLA M H, TISSUE D T, CAZZONELLI C I, et al. Effect of high light on canopy-level photosynthesis and leaf mesophyll ion flux in tomato [J]. *Planta*, 2020, 252 (5): 80.
- [7] EGUCHI T, TANAKA H, MORIUCHI D, et al. Temperature effects on the photosynthesis by the medicinal plant *Pinellia ternata* Breit [J]. *Environment Control in Biology*, 2020, 58 (2): 49–50.
- [8] VICO G, WAY D A, HURRY V, et al. Can leaf net photosynthesis acclimate to rising and more variable temperatures? [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42 (6): 1913–1928.
- [9] 邢钰媛, 娄运生, 王坤, 等. 施用生物炭和硅肥对增温水稻叶片光合及荧光特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40 (2):

- 451–463.
- XING Y Y, LOU Y S, WANG K, et al. Effects of biochar and silicate supply on photosynthetic and fluorescence characteristics of rice leaves under nighttime warming [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40 (2) : 451–463. (in Chinese)
- [10] EGEA G, VERHOEF A, VIDALE P L. Towards an improved and more flexible representation of water stress in coupled photosynthesis-stomatal conductance models [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151 (10) : 1370–1384.
- [11] 苗玉, 高冠龙, 李伟. 黄土高原苹果树叶片气孔导度的环境响应与模拟 [J]. *干旱区地理*, 2021, 44 (2) : 525–533.
- MIAO Y, GAO G L, LI W. Environmental response and modeling of stomatal conductance of apple trees on the Loess Plateau [J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44 (2) : 525–533. (in Chinese)
- [12] 艾雪莹, 吴奇, 周宇飞, 等. 干旱-复水条件下氮素对高粱光合特性及抗氧化代谢的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37 (5) : 99–105, 113.
- AI X Y, WU Q, ZHOU Y F, et al. Effects of nitrogen on photosynthesis and antioxidant enzyme activities of *Sorghum* under drought stress and re-watering [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37 (5) : 99–105, 113. (in Chinese)
- [13] LIU G Y, DU Q J, LI J M. Interactive effects of nitrate-ammonium ratios and temperatures on growth, photosynthesis, and nitrogen metabolism of tomato seedlings [J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 214: 41–50.
- [14] ZHANG Y Q, WANG J D, GONG S H, et al. Nitrogen fertigation effect on photosynthesis, grain yield and water use efficiency of winter wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 277–287.
- [15] 杨珊珊, 王茜, 胡庭兴, 等. 3种农作物(玉米、黄瓜、豇豆)对银木凋落叶化感作用的生理响应 [J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24 (2) : 292–298.
- YANG S S, WANG Q, HU T X, et al. Physiological responses to allelopathy of decomposing *Cinnamomum septentrionale* leaf litter of three crops(corn, cucumber, and cowpea) [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, 24 (2) : 292–298. (in Chinese)
- [16] DILLAWAY D N, KRUGER E L. Trends in seedling growth and carbon-use efficiency vary among broadleaf tree species along a latitudinal transect in eastern North America [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20 (3) : 908–922.
- [17] 连亚妮, 杨可伟, 牟洪香, 等. 农田防护林系统植物水分利用效率研究 [J]. *林业与生态科学*, 2021, 36 (3) : 229–235.
- LIAN Y N, YANG K W, MU H X, et al. Study on the plant water use efficiency (WUE) of farmland shelterbelts system [J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2021, 36 (3) : 229–235. (in Chinese)
- [18] BRADFORD M A, CROWTHER T W. Carbon use efficiency and storage in terrestrial ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2013, 199 (1) : 7–9.
- [19] 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 等. 2000—2013年中国植被碳利用效率(CUE)时空变化及其与气象因素的关系 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26 (5) : 278–286, 2.
- LIU Y Y, WANG Q, YANG Y, et al. Spatiotemporal dynamic of vegetation carbon use efficiency and its relationship with climate factors in China during the period 2000–2013 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26 (5) : 278–286, 2. (in Chinese)
- [20] DELUCIA E H, DRAKE J E, THOMAS R B, et al. Forest carbon use efficiency: Is respiration a constant fraction of gross primary production? [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13 (6) : 1157–1167.
- [21] MARTHEWS T R, MALHI Y, GIRARDIN C A J, et al. Simulating forest productivity along a neotropical elevational transect: Temperature variation and carbon use efficiency [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18 (9) : 2882–2898.
- [22] FRANTZ J M, BUGBEE B. Acclimation of plant populations to shade: Photosynthesis, respiration, and carbon use efficiency [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2005, 130 (6) : 918–927.
- [23] VICCA S, LUYSSAERT S, PEÑUELAS J, et al. Fertile forests produce biomass more efficiently [J]. *Ecology Letters*, 2012, 15 (6) : 520–526.
- [24] 韩艳红, 于沐, 石彦召, 等. 基于隶属函数法对13个花生品种品质的综合评价 [J]. *中国农学通报*, 2022, 38 (2) : 7–11.
- HAN Y H, YU M, SHI Y Z, et al. Comprehensive evaluation of the quality of 13 peanut varieties by membership function method [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38 (2) : 7–11. (in Chinese)
- [25] 高应敏, 苏艳. 普洱市生态咖啡园管理农艺措施 [J]. *云南农业科技*, 2019 (3) : 39–41.
- GAO Y M, SU Y. Agronomic measures of ecological coffee garden management in Pu'er City [J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2019 (3) : 39–41. (in Chinese)
- [26] 郑雅婷, 王学春, 胡瑶, 等. 秸秆还田对梓潼江流域土壤肥力及粮食生产的影响 [J]. *西南农业学报*, 2021, 34 (7) : 1510–1514.
- ZHENG Y T, WANG X C, HU Y, et al. Effects of straw returning on soil fertility and grain production in Zitong River Basin [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34 (7) : 1510–1514. (in Chinese)
- [27] CASTRO-DÍEZ P, ALONSO Á, ROMERO-BLANCO A. Effects of litter mixing on litter decomposition and soil properties along simulated invasion gradients of non-native trees [J]. *Plant and Soil*, 2019, 442 (1/2) : 79–96.
- [28] 陈毅青, 陈宗铸, 陈小花, 等. 海南岛东南沿海地区不同森林类型林地凋落物现存量 and 养分特征 [J]. *热带作物学报*, 2021, 42 (4) : 1159–1165.
- CHEN Y Q, CHEN Z Z, CHEN X H, et al. Stock and nutrient characteristics of litter at different forest types in the southeast coast of Hainan Island [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42 (4) : 1159–1165. (in Chinese)
- [29] JANISSEN B, HUYNH T. Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 128: 110–117.
- [30] 杨晶晶, 周正立, 吕瑞恒, 等. 干旱生境下3种植物叶凋落物分解动态特征 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36 (4) : 916–923.
- YANG J J, ZHOU Z L, LYU R H, et al. Dynamic decomposition of foliar litters of three plant species in arid habitats [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36 (4) : 916–923. (in Chinese)
- [31] 曾锋, 邱治军, 许秀玉. 森林凋落物分解研究进展 [J]. *生态环境学*

- 报, 2010, 19 (1): 239–243.
- ZENG F, QIU Z J, XU X Y. Review on forest litter decomposition [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19 (1): 239–243. (in Chinese)
- [32] 王金悦, 邓羽松, 林立文, 等. 南亚热带5种典型人工林凋落物水文效应 [J]. 水土保持学报, 2020, 34 (5): 169–175.
- WANG J Y, DENG Y S, LIN L W, et al. Study on the hydrological effects of the litters layer from five typical plantations in south subtropics of China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (5): 169–175. (in Chinese)
- [33] STOY P C, EL-MADANY T S, FISHER J B, et al. Reviews and syntheses: Turning the challenges of partitioning ecosystem evaporation and transpiration into opportunities [J]. *Biogeosciences*, 2019, 16 (19): 3747–3775.
- [34] 韦婷婷, 杨再强, 王明田, 等. 高温与空气湿度交互对花期番茄植株水分生理的影响 [J]. 中国农业气象, 2019, 40 (5): 317–326.
- WEI T T, YANG Z Q, WANG M T, et al. Effects of high temperature and different air humidity on water physiology of flowering tomato seedlings [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40 (5): 317–326. (in Chinese)
- [35] WAGNER Y, POZNER E, BAR-ON P, et al. Rapid stomatal response in lemon saves trees and their fruit yields under summer desiccation, but fails under recurring droughts [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 307: 108487.
- [36] 杨天乐, 吴峰峰, 刘涛, 等. 作物气孔的作用及其影响因素的研究进展 [J]. 北方园艺, 2020 (3): 143–148.
- YANG T L, WU F F, LIU T, et al. Research progress on the role of crop stomata and its influencing factors [J]. *Northern Horticulture*, 2020 (3): 143–148. (in Chinese)
- [37] HUSSAIN A, ARSHAD M, AHMAD Z, et al. Potassium fertilization influences growth, physiology and nutrients uptake of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Cercetari Agronomice in Moldova*, 2015, 48 (1): 37–50.
- [38] 孙燕, 董云萍, 龙宇宙, 等. 施氮量对咖啡生长及光合特征的影响 [J]. 热带作物学报, 2019, 40 (2): 215–220.
- SUN Y, DONG Y P, LONG Y Z, et al. Growth and photosynthetic characteristics of coffee under different nitrogen level [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40 (2): 215–220. (in Chinese)
- [39] DAMATTA F M, GODOY A G, MENEZES-SILVA P E, et al. Sustained enhancement of photosynthesis in coffee trees grown under free-air CO₂ enrichment conditions: Disentangling the contributions of stomatal, mesophyll, and biochemical limitations [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 67 (1): 341–352.
- [40] BARBOSA S M, SILVA B M, DE OLIVEIRA G C, et al. Deep furrow and additional liming for coffee cultivation under first year in a naturally dense inceptisol [J]. *Geoderma*, 2020, 357: 113934.
- [41] 罗明霞, 胡宗达, 刘兴良, 等. 川西亚高山不同林龄粗枝云杉人工林土壤微生物生物量及酶活性 [J]. 生态学报, 2021, 41 (14): 5632–5642.
- LUO M X, HU Z D, LIU X L, et al. Characteristics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in *Picea asperata* plantations with different ages in subalpine of western Sichuan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (14): 5632–5642. (in Chinese)
- [42] 沈立明, 钟惠, 朱雅婷, 等. 温度胁迫下4种广义虾脊兰属植物的光合特性 [J]. 森林与环境学报, 2021, 41 (1): 60–65.
- SHEN L M, ZHONG H, ZHU Y T, et al. Photosynthetic characteristics of four *Calanthe* s. L. species under temperature stress [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021, 41 (1): 60–65. (in Chinese)
- [43] SONG Y P, CHEN Q Q, CI D, et al. Effects of high temperature on photosynthesis and related gene expression in poplar [J]. *BMC Plant Biology*, 2014, 14: 111.
- [44] LU Z F, XIE K L, PAN Y H, et al. Potassium mediates coordination of leaf photosynthesis and hydraulic conductance by modifications of leaf anatomy [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42 (7): 2231–2244.
- [45] 王双成, 黄华梨, 张露荷, 等. 不同时期根施钾肥对沿黄灌区“骏枣”光合特性及其产量和品质的影响 [J]. 西北植物学报, 2020, 40 (6): 1022–1030.
- WANG S C, HUANG H L, ZHANG L H, et al. Effect of root application of potassium fertilizer in different periods on photosynthetic characteristics, yield and quality of Junzao in irrigation area along the Yellow River [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40 (6): 1022–1030. (in Chinese)
- [46] KUBIEN D S, SAGE R F. The temperature response of photosynthesis in tobacco with reduced amounts of Rubisco [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2008, 31 (4): 407–418.
- [47] 周敏, 曾蓓, 赵玉华, 等. 钾对刺葡萄光合作用的影响 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43 (2): 156–160.
- ZHOU M, ZENG B, ZHAO Y H, et al. Effects of potassium on the photosynthesis of *Vitis davidii* foëx [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2017, 43 (2): 156–160. (in Chinese)
- [48] PIAO S L, LUYSSAERT S, CIAIS P, et al. Forest annual carbon cost: A global-scale analysis of autotrophic respiration [J]. *Ecology*, 2010, 91 (3): 652–661.
- [49] JONES D L, OLIVERA-ARDID S, KLUMPP E, et al. Moisture activation and carbon use efficiency of soil microbial communities along an aridity gradient in the Atacama Desert [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 68–71.
- [50] TJOELKER M G. The role of thermal acclimation of plant respiration under climate warming: Putting the brakes on a runaway train? [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2018, 41 (3): 501–503.
- [51] CHU Z Y, LU Y J, CHANG J, et al. Leaf respiration/photosynthesis relationship and variation: An investigation of 39 woody and herbaceous species in east subtropical China [J]. *Trees*, 2011, 25 (2): 301–310.
- [52] HUNTINGFORD C, ATKIN O K, MARTINEZ-DE LA TORRE A, et al. Implications of improved representations of plant respiration in a changing climate [J]. *Nature Communications*, 2017, 8 (1): 1602.
- [53] WEI D, QI Y H, MA Y M, et al. Plant uptake of CO₂ outpaces losses from permafrost and plant respiration on the Tibetan Plateau [J]. *PNAS*, 2021, 118(33). Doi:10.1073/pnas.2015283118.