

DOI: 10.11686/cyxb2024415

http://cyxb.magtech.com.cn

陈俊玲, 王莎莎, 叶菁, 等. 长期不同果园生草覆盖下土壤碳矿化及其温度敏感性研究. 草业学报, 2025, 34(9): 53-64.

CHEN Jun-ling, WANG Sha-sha, YE Jing, et al. Soil carbon mineralization in an orchard with and without interplanted ground cover species and its temperature sensitivity under long-term conditions. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(9): 53-64.

长期不同果园生草覆盖下土壤碳矿化及其温度敏感性研究

陈俊玲^{2,3}, 王莎莎^{2,3}, 叶菁^{1,3}, 林怡^{1,3}, 王义祥^{1,3*}

(1. 福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所, 福建 福州 350013; 2. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002; 3. 福建省红壤山地农业生态过程重点实验室, 福建 福州 350003)

摘要: 生草覆盖作为一种生态友好型果园管理方式引起关注, 但不同生草覆盖对土壤碳矿化及其温度敏感性作用机制仍缺乏认识。本研究基于福建省尤溪县玉池村28年的长期定位试验, 研究清耕、果园套种圆叶决明和平托花生3种地被管理方式下果园土壤矿化速率及其温度敏感性的变化, 为亚热带地区气候变化背景下果园土壤固碳减排与科学管理提供理论依据。结果表明: 相对清耕模式, 果园生草覆盖处理28年后土壤有机碳含量增加了19.20%~30.04%。在不同生草覆盖模式下, 土壤有机碳累积矿化量与培养时间和温度呈正相关关系。在35℃时, 果园套种平托花生处理的有机碳累积矿化量最高, 为633.41 mg·kg⁻¹, 套种圆叶决明处理次之, 两者分别比清耕处理提高72.75%和61.27%, 潜在矿化量分别提高2.98和1.14倍。高温条件下(>25℃), 果园套种平托花生和圆叶决明处理土壤矿化温度敏感性系数(Q₁₀)分别比清耕处理降低了35.20%和47.37%。综上, 长期果园生草覆盖提高了土壤有机碳含量, 随着温度变化(>25℃), 果园土壤有机碳矿化的温度敏感性随之降低, 土壤碳库应对温度变化的响应稳定。其中平托花生覆盖处理效果优于圆叶决明覆盖处理。

关键词: 果园生草覆盖; 土壤有机碳; 矿化速率; 温度敏感性

Soil carbon mineralization in an orchard with and without interplanted ground cover species and its temperature sensitivity under long-term conditions

CHEN Jun-ling^{2,3}, WANG Sha-sha^{2,3}, YE Jing^{1,3}, LIN Yi^{1,3}, WANG Yi-xiang^{1,3*}

1. Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Fujian Province Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Hilly Red Soil, Fuzhou 350003, China

Abstract: Establishing ground cover is an eco-friendly orchard management method, but it is still poorly understood how different types of cover affect soil carbon mineralization and its temperature sensitivity. Based on a 28-year long-term monitoring experiment in Yuchi Village, Youxi County, Fujian Province, we investigated the changes in the soil mineralization rate and its temperature sensitivity in orchards with three different ground cover management strategies; clear tillage, and orchard interplanting with the legumes round-leaf cassia (*Chamaecrista rotundifolia*) or *Arachis pintoi*. The overall aim of this work was to provide a theoretical basis for reducing emissions of carbon

收稿日期: 2024-10-22; 改回日期: 2024-12-16

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(2023L3022), 福建省自然科学基金(2023J01191)和福建省农业科学院协同创新工程项目(XTCXGC2021010)资助。

作者简介: 陈俊玲(2001-), 女, 贵州毕节人, 在读硕士。E-mail: 13027267589@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: sd_wolong@163.com

sequestered in soil and for the scientific management of orchards in subtropical regions under climate change. The results showed that, compared with clear tillage, the interplanting treatments led to increased soil organic carbon content (SOC) (by 19.20%–30.04%) after 28 years. Across both interplanting modes, the cumulative mineralization of SOC was positively correlated with the incubation time and temperature. At 35 °C, the highest cumulative mineralization of SOC was in the *A. pintoi* interplanting treatment (633.41 mg·kg⁻¹), followed by the *C. rotundifolia* interplanting treatment; their SOC values were 72.75% and 61.27% higher than that of the clear tillage treatment, respectively. The potential mineralization was increased by 2.98 times in the *A. pintoi* interplanting treatment and by 1.14 times in the *C. rotundifolia* interplanting treatment, compared with the clear tillage treatment. Under high-temperature conditions (>25 °C), the soil mineralization temperature sensitivity coefficient (Q_{10}) of the *A. pintoi* interplanting treatment and the *C. rotundifolia* interplanting treatment were 35.20% and 47.37% lower, respectively, than that of the clear tillage treatment. In conclusion, long-term ground cover increased the SOC content of soil, and with increasing temperatures (>25 °C), the temperature sensitivity of SOC mineralization in the soil decreased, and the response of the soil carbon pool to temperature change increased. Among the tested treatments, the *A. pintoi* interplanting treatment was more beneficial than the *C. rotundifolia* interplanting treatment.

Key words: orchard grass cover; soil organic carbon; mineralization rate; temperature sensitivity

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)库在陆地生态系统中占据着至关重要的位置,是陆地生态系统中最大的碳库。全球地表至1 m深的土壤有机碳储量达1500 Pg,2 m范围内土壤有机碳储量达2200 Pg^[1-2]。土壤有机碳矿化是土壤生态系统中的一个重要生化过程,受环境因素如温度的影响。全球气候变化对土壤碳矿化及其温度敏感性有显著影响。随着全球变暖,土壤有机碳的矿化速率可能会增加,从而影响土壤碳的固定和释放^[3]。因此,研究土壤碳循环过程、机制及其影响因子,对于准确评估土壤碳库的稳定性和预测未来气候变化情景下的碳循环动态具有迫切的需求^[4]。果园是我国重要的土地利用类型之一。据统计,2023年我国果园面积为1.3×10⁷ hm²,超过世界水果总种植面积的30%,在推动乡村振兴和双碳发展中具有重要作用。地被(杂草)管理是保障果树健康生长,提高果实产量和品质的重要措施,同时也是影响土壤物理条件、养分有效性、碳库储量和稳定性的重要因素^[5]。目前,我国果园杂草大多采用化学方法防治,但大量使用除草剂不仅造成土壤、大气和水资源的污染,而且长期使用会影响土壤肥力和降低果品品质^[6]。同时杂草清除导致地表裸露,又会引发水土流失等一系列问题^[7]。而果园生草覆盖能调节果园的小气候,增加果园生物多样性,增强土壤的保肥保水能力,提高果园固碳能力,同时在果树生长和果实品质方面,还能提高果树的抗逆性,利于提高果实的品质。随着国际社会对生态环境问题的关注,许多国家和地区根据果园环境、经济收益高低的不同采取了多种的地被管理策略,如化学除草加杂草覆盖、生草栽培等,且近年来被作为实现果园固碳减排的措施而受到广泛关注。

土壤有机碳矿化是极其复杂的生物化学过程。这一过程受到众多因素的综合调控^[8]。其中温度是影响碳收支平衡的重要因素,碳矿化作为土壤有机碳分解的关键过程,直接影响着土壤碳的释放和固定。研究发现,土壤有机碳的矿化速率和累积矿化量与温度呈现正相关关系,后期逐渐平稳^[9-10]。温度是土壤有机碳矿化的主要因子之一。其变化的程度可用温度敏感性系数(Q_{10})反映^[11]。 Q_{10} 表示温度每升高10 °C时SOC矿化速率的增加倍数,能在一定程度上反映土壤有机碳矿化速率对增温的响应^[8]。其值越大,表示SOC矿化对温度的变化越敏感^[12]。以往研究表明,SOC矿化的温度敏感性受多种因素影响,如植被类型^[13]、土壤团聚体组成^[14]等,但由于环境因子和各项影响因素不一,存在争议。目前增温对土壤有机碳的影响机制仍存在诸多未解决的问题^[15]。植被恢复被认为是缓解气候变化最有效的策略之一^[16]。在不同的生态系统中, Q_{10} 值的变化规律不同,这表明在全球尺度上,土壤碳矿化对温度变化的响应具有复杂性。近年来,生草覆盖作为一种生态友好的果园土地管理方式逐渐引起了广泛的研究,生草覆盖可以改变土壤的理化等性质,进而影响土壤碳矿化过程^[17]。不同类型生草覆盖可能会产生不同程度的影响,其对土壤碳矿化温度敏感性的作用机制可能存在差异。理解地被管理下土壤碳矿化

及其对温度的敏感性,增强土壤对气候变化的抵抗力,对于实现碳中和目标和农业可持续发展具有重要意义。故此,本研究以不同生草覆盖[清耕、套种圆叶决明(*Chamaecrista rotundifolia*)和平托花生(*Arachis pintoi*)]为对象,利用碳矿化培养试验探讨不同温度对果园土壤碳矿化过程的影响,以期揭示不同温度刺激下果园生草覆盖处理土壤矿化特征和进一步完善土壤碳循环模型,优化果园地被管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于福建省尤溪县西城镇玉池村,坐标为 $26^{\circ}25' N, 117^{\circ}57' E$,属中亚热带季风性湿润气候,年平均气温 $19.1^{\circ}C$,无霜期233~299 d,年均降水量1600~1800 mm,蒸发量1326.6~1380.0 mm,日照时间约1679 h^[18]。试验土壤类型为红壤,0~20 cm土层土壤基础指标为:有机质 $23.1 g \cdot kg^{-1}$,全氮 $0.96 g \cdot kg^{-1}$,全磷 $0.23 g \cdot kg^{-1}$,碱解氮 $100.85 mg \cdot kg^{-1}$,速效钾 $31.605 mg \cdot kg^{-1}$ 。试验采用裂区设计,每个小区面积为 $30 m \times 5 m$,共3个处理,即果园地被管理方式分别为清耕(CT)、园面套种圆叶决明(IC)和平托花生(IA)(图1),每个处理3个重复。其中IC处理为每年4月左右播种,冬季地上部分枯萎后清园;IA处理平托花生套种方式为带状,冬季平托花生地上部分枯死,但到第2年春季可自然萌发。本试验自1996年开始,由山地开垦而成,海拔360 m。试验前各处理小区的立地条件基本一致,2009年之前建植油桃(*Amygdalus persica*),之后改植为甜柿(*Diospyros kaki*)。果园实施定期施肥,每年施复合肥2~3次,不施用有机肥。果树管理均按照常规管理进行病虫害防治,灌溉方式为雨水灌溉。

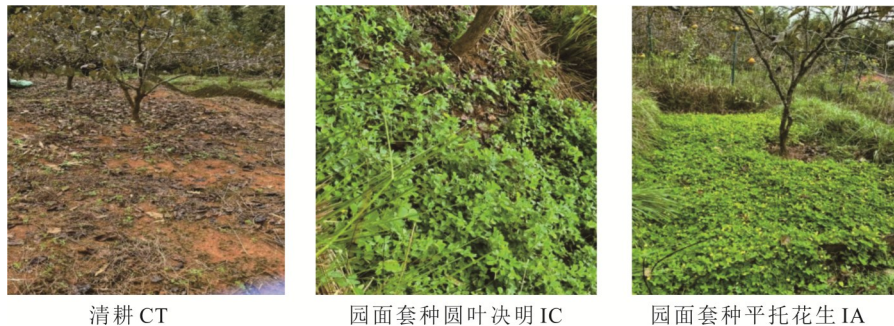


图1 各处理生草覆盖情况

Fig. 1 The grass cover situation in each treatment

1.2 样品采集

于2024年4月上旬,在每个区块内按S形布设取样点,共5个点,每个取样点采集果园0~20 cm土层样品,大小约为 $20 cm \times 20 cm$,采集后按四分法^[19]取混合土样2份,一份自然风干后用于测定初始土壤理化性质,另一份鲜土在 $4^{\circ}C$ 下储存用于土壤矿化培养试验。

1.3 试验方法

土壤样品过2 mm筛,称取125 g风干土置于250 mL培养瓶中,调节土壤含水量至田间持水量的60%,置于 $25^{\circ}C$ 培养箱内预培养7 d。然后将不同试验处理的预培养土壤分别置于15、25、 $35^{\circ}C$ 下恒温培养,每个温度条件下每个处理3个重复,同时设置空白对照。培养期间采用称重法^[18]调节土壤含水量,使其保持在田间持水量的60%。采用碱吸收法^[18]于培养第1、3、5、7、10、15、22、29、36、44、50、65、80天测定土壤有机碳矿化速率。

1.4 土壤性质测定

土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定;可溶性有机碳含量采用总有机碳分析仪[岛津TOC-VCPH(含TNM配件),日本]测定;易氧化有机碳(easily oxidized organic carbon, EOC)含量采用 $333 mmol \cdot L^{-1}$ 高锰酸钾氧化法测定;土壤pH用pH计(DDS-120W,上海般特仪器有限公司)在水土比5:1下测定;土壤电导率(electrical conductivity, EC)采用电导率仪(S230,上海)测定;土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)含量采用氯仿熏蒸法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定^[19]。

土壤有机碳矿化量的计算公式为:

$$MC = \frac{(V_0 - V) \times C_{HCl} \times M_{CO_2} \times 10^3}{2M} \quad (1)$$

式中: MC 为土壤有机碳矿化量 ($mg \cdot kg^{-1}$); V_0 为空白对照消耗的盐酸体积 (mL); V 为滴定样品时消耗的盐酸体积 (mL); C_{HCl} 为盐酸的标准浓度 ($mol \cdot L^{-1}$); M_{CO_2} 为 CO_2 的标准摩尔质量 ($44 g \cdot mol^{-1}$); M 为培养瓶内土壤的质量 (g)。

有机碳矿化速率的计算公式为:

$$R = \frac{MC}{t} \quad (2)$$

式中: R 为某时间段内土壤有机碳矿化速率 ($mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$); t 为时间间隔 (d)。

温度敏感性系数 (Q_{10}) 的计算公式为:

$$Q_{10} = \left(\frac{R_{t_2}}{R_{t_1}} \right)^{\frac{10}{t_2 - t_1}} \quad (3)$$

式中: t_1 、 t_2 代表温度 ($^{\circ}C$); R_{t_1} 、 R_{t_2} 代表相应培养温度下土壤有机碳的矿化速率。

土壤有机碳矿化过程采用一级反应方程式模拟, 计算公式为:

$$C_t = C_0 [1 - \exp(-kt)] \quad (4)$$

式中: C_t 为时间 t 内累积的碳 ($g \cdot kg^{-1}$); C_0 为土壤潜在矿化碳库 ($g \cdot kg^{-1}$); k 为土壤矿化系数 ($g \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$)^[20]。

半衰期 $T_{1/2}$ (d) 的计算公式为:

$$T_{1/2} = \ln \frac{2}{k}$$

1.5 数据处理与分析

利用 Excel 2020、SPSS、Oringin 2024 等软件进行数据整理、统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳含量

15 $^{\circ}C$ 培养条件下, 套种圆叶决明 (IC) 和平托花生 (IA) 处理土壤 SOC 含量显著高于清耕 (CT) 处理, 三者差异显著 ($P < 0.05$), 其中 IA 处理最高, 为 $20.33 g \cdot kg^{-1}$, 其次是 IC 处理 ($18.93 g \cdot kg^{-1}$)。25 $^{\circ}C$ 培养条件下, IC 和 IA 处理间无显著差异 ($P > 0.05$), 但二者与 CT 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。35 $^{\circ}C$ 条件下 3 个处理的 SOC 含量变化与 25 $^{\circ}C$ 相似。随着温度的升高, 3 种处理 SOC 含量都有不同程度的降低, 其中 IA 处理下降幅度最大, 25 和 35 $^{\circ}C$ 相较 15 $^{\circ}C$ 条件 SOC 含量分别下降了 2.16%、7.27% (图 2)。

2.2 土壤有机碳矿化速率

清耕 (CT)、套种圆叶决明 (IC) 和平托花生 (IA) 处理土壤 SOC 矿化速率均随培养时间延长呈下降趋势, 三者动态变化趋势一致 (图 3)。根据变化过程, 可将有机碳矿化过程分为两个阶段: 在第 0~22 天为活跃期, 第 22~80 天为惰性期。自第 22 天开始 3 个处理间土壤 SOC 矿化速率先升高后下降, 活跃期内 IC 和

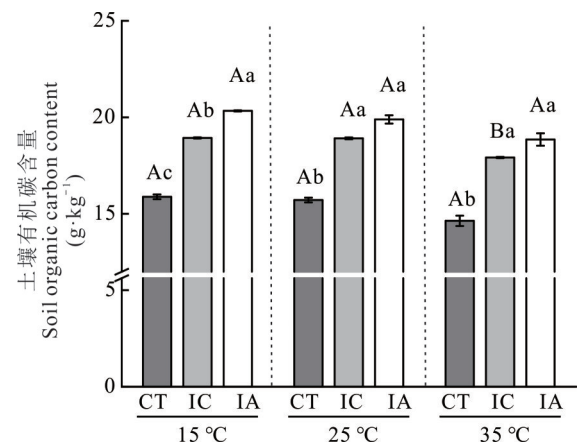


图 2 不同培养温度下土壤有机碳含量

Fig. 2 Soil organic carbon content at different culture temperatures

不同大写字母表示同一处理不同温度间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一温度不同处理间差异显著 ($P < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences among different temperatures of the same treatment ($P < 0.05$), different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the same temperature ($P < 0.05$).下同 The same below.

IA处理矿化速率均高于CT处理(图3a)。CT、IC和IA处理土壤SOC矿化速率也呈现随培养时间延长而下降的趋势,在25℃条件下,IA处理在培养初期高于CT和IC处理,在35℃条件下,IC处理在培养初期高于CT和IA处理。在23 d后趋于平缓,无明显变化(图3b,c)。

根据动力学理论,有机碳的活化能与温度成正比,反应速率与温度也呈正相关^[8]。3种温度条件下,不同处理SOC矿化速率最大值随着温度升高而增大,15℃时最大值为IA处理($8.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$);25℃处理时最大值为IA处理($29.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$);35℃处理时最大值为IC处理($47.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)(图3)。

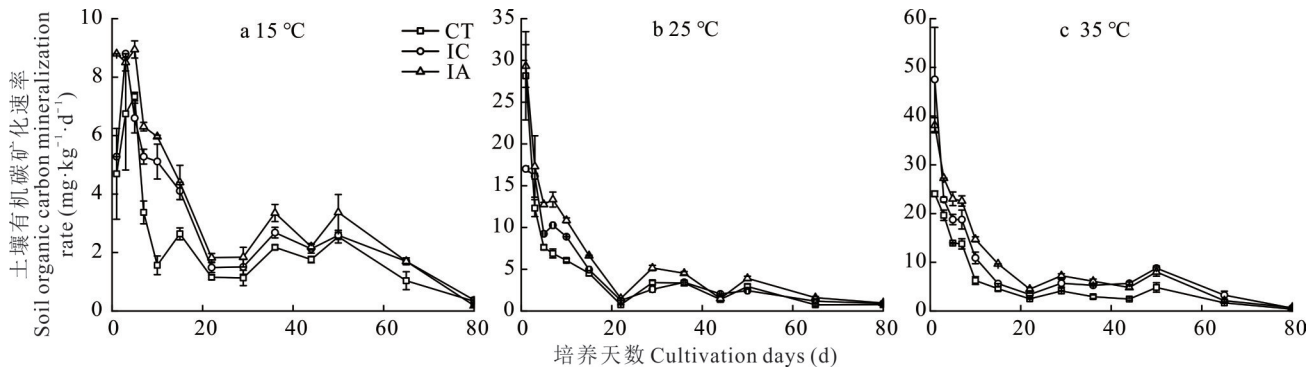


图3 不同培养温度下的土壤有机碳矿化速率

Fig. 3 Soil organic carbon mineralization rates at different culture temperatures

2.3 累积矿化量

累积矿化量是土壤有机碳矿化速率的表征之一^[21]。在15℃条件下,IA处理土壤有机碳矿化累积量最高,在80 d时达 $247.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别比CT和IC处理增加了56.90%和17.00%,IC处理也比CT处理增加了34.10%(图4a)。IA处理累积矿化量在25℃培养条件下达到最大,且与CT和IC处理有差异(图4b)。图4表明不同处理在不同温度下土壤有机碳累积矿化量存在差异。3个处理在垂直方向上变化趋势一致,均随着培养温度增加呈增加趋势,其中CT处理增幅较小,同一温度下不同处理土壤有机碳累积矿化量大小趋势一致:IA>IC>CT。在35℃条件下,IA处理累积矿化量最大,80 d时是IC处理的1.07倍,CT处理的1.73倍;相较于25℃条件下,累积矿化量增加了58.84%,相较于15℃增加了156.36%。

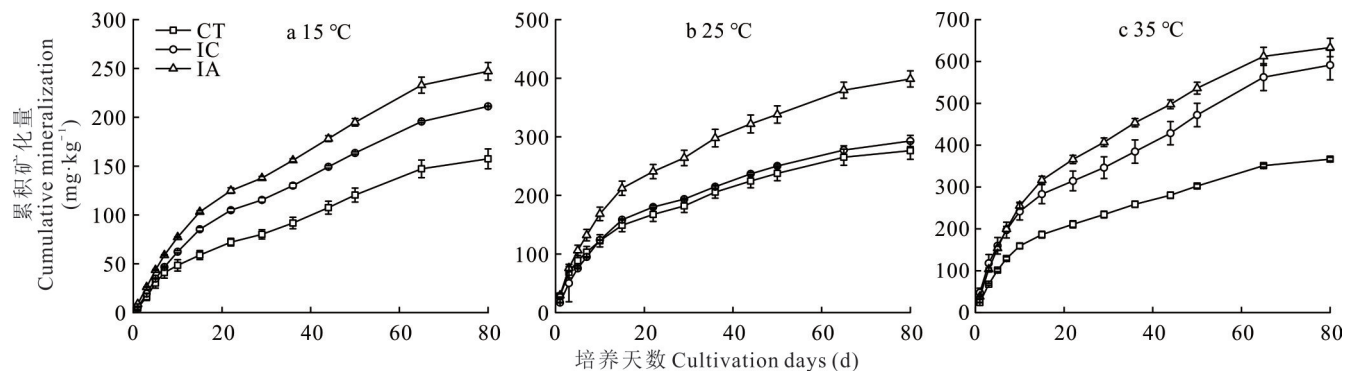


图4 不同培养温度下土壤有机碳的累积矿化量

Fig. 4 Cumulative mineralization of soil organic carbon at different culture temperatures

3个处理土壤有机碳累积矿化量均表现为随着温度升高而增加。80 d时25℃条件下3个处理土壤有机碳累积矿化量比15℃条件下增加了72.40%~81.30%,35℃条件下增幅为192.80%~218.40%,其中以IC处理的增幅最大(图5)。

2.4 温度敏感性

培养温度为15~25℃时,不同生草覆盖处理 Q_{10} 值随培养时间延长呈下降的趋势,各处理 Q_{10} 值总体变化表现为生草处理高于清耕处理,第80天时IA处理 Q_{10} 值较CT和IC处理分别高5.10%和3.40%。培养温度为25~35℃时,不同生草覆盖处理 Q_{10} 值表现为CT和IC处理高于IA处理,其中CT和IC处理分别比IA处理高11.10%~115.50%、4.90%~39.50%。第80天时CT处理25~35℃培养温度的 Q_{10} 值比15~25℃高出4.30%,IC处理升高3.80%,而IA处理降低11.00%(图6)。

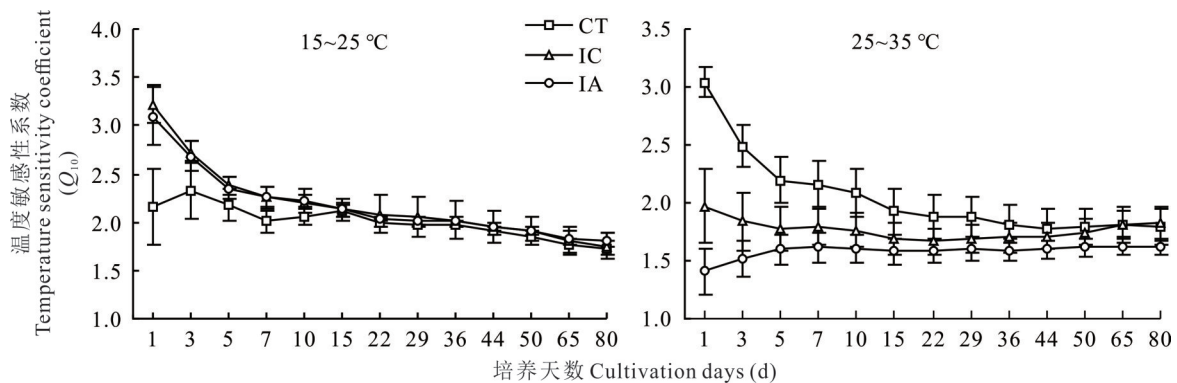


图6 土壤有机碳矿化在不同温度区间的温度敏感性系数

Fig. 6 Temperature sensitivity coefficient of soil organic carbon mineralization at different temperature ranges

2.5 有机碳矿化过程的模拟

根据一级动力学方程模拟土壤有机碳矿化动态拟合参数,可见一级动力学方程对各处理土壤有机碳矿化过程中的累积矿化量均具有良好的拟合效果,其拟合优度 R^2 值均通过了显著性水平为5%的检验(表1)。不同温度条件下各处理土壤有机碳潜在矿化量(C_0)为3.01~47.51 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;有机碳矿化速率常数(k)为0.0002~0.0007;半衰期($T_{1/2}$)为7.99~9.38 d。在15℃条件下,有机碳潜在矿化量变化显著($P<0.05$)。IA处理有机碳潜在矿化量和半衰期最大,分别为7.31 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和8.44 d;25℃时,IA和IC处理土壤有机碳潜在矿化量以及半衰期高于CT处理;在35℃条件下IA处理土壤有机碳潜在矿化量以及半衰期高于IC和CT处理土壤。随着培养温度上升,3个处理有机碳潜在矿化量和半衰期相应增加,但矿化速率常数相反。IA处理的土壤有机碳潜在矿化量在35℃下最大,是15℃的6.50倍,25℃的2.51倍,半衰期最长,达9.38 d,相较于15和25℃分别增加11.16%和5.18%。

2.6 与环境因子关联分析

相关性分析结果显示(图7),pH与矿化速率(R)、矿化量(C_t)以及潜在矿化量(C_0)间均呈极显著负相关($P<0.001$),土壤电导率(EC)与矿化速率(R)、矿化量(C_t)以及潜在矿化量(C_0)间均呈极显著正相关($P<0.001$)。土壤总氮(total soil nitrogen, TN)与15~25℃(Q_1)培养温度的 Q_{10} 值间存在显著的相关性($P<0.01$)。TN、SOC与25~35℃(Q_2)培养温度的 Q_{10} 值均呈极显著负相关($P<0.001$)。pH与25~35℃(Q_2)培养温度的 Q_{10} 值呈极显著正相关($P<0.001$)。

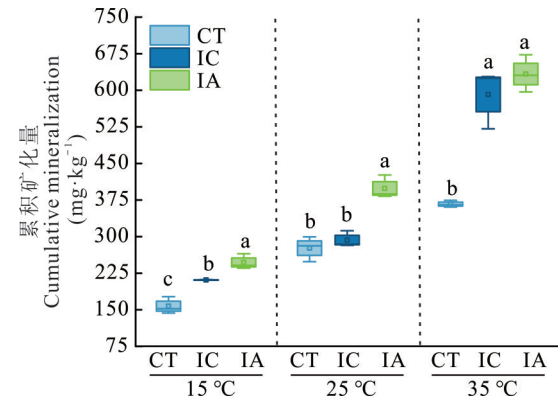


图5 不同处理累积矿化量随温度的变化

Fig. 5 The changes of cumulative mineralization of different treatments with temperature

表 1 不同温度条件下不同处理间土壤有机碳矿化拟合结果

Table 1 Fitting results of soil organic carbon mineralization under different temperature conditions and different treatments

培养温度 Culture temperature (°C)	指标 Index	处理 Treatments		
		CT	IC	IA
15	C_0 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	3.013±0.387c	5.338±0.017b	7.306±0.534a
	k	0.0007±0.0001a	0.0005±0.0001b	0.0004±0.0001b
	$T_{1/2}$ (d)	7.988±0.063c	8.285±0.002b	8.440±0.036a
	R^2	0.972	0.987	0.984
	Sig	$P<0.001$	$P<0.018$	$P<0.001$
25	C_0 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	9.158±0.963b	10.235±0.676b	18.902±1.323a
	k	0.0004±0.0001a	0.0004±0.0001a	0.0003±0.0001b
	$T_{1/2}$ (d)	8.551±0.055b	8.611±0.032b	8.920±0.034a
	R^2	0.943	0.977	0.973
	Sig	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$
35	C_0 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	15.962±0.356b	41.615±4.754a	47.506±3.288a
	k	0.0003±0.0000a	0.0002±0.0000b	0.0002±0.0000b
	$T_{1/2}$ (d)	8.837±0.011b	9.311±0.062a	9.382±0.035a
	R^2	0.953	0.929	0.975
	Sig	$P<0.001$	$P<0.026$	$P<0.001$

C_0 : 土壤潜在矿化碳库 Soil potential mineralized carbon pool; k : 土壤矿化系数 Soil mineralization coefficient; $T_{1/2}$: 半衰期 Half-life; R^2 : 拟合优度 Goodness of fit; Sig: 显著性水平 Significance level. 同行不同小写字母表示该温度条件下不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among different treatments at the same temperature ($P<0.05$).

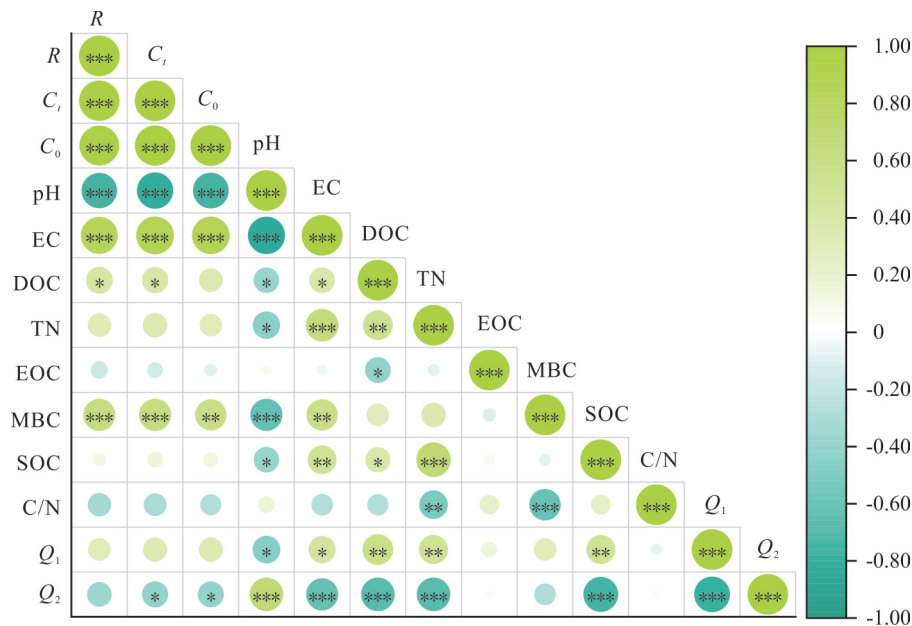


图 7 各指标间的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis among various indicators

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$. R : 土壤有机碳矿化速率 Soil organic carbon mineralization rate; C_t : 累积矿化量 Cumulative mineralization; C_0 : 土壤潜在矿化碳库 Soil potential mineralized carbon pool; EC: 土壤电导率 Electrical conductivity; DOC: 可溶性有机碳 Soil soluble organic carbon; TN: 土壤总氮 Soil total nitrogen; EOC: 易氧化有机碳 Easily oxidized organic carbon; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; SOC: 土壤有机碳含量 Soil total organic carbon content; C/N: 碳氮比 The ratio of carbon to nitrogen; Q_1 : 15~25 °C 温度敏感性系数 Temperature sensitivity coefficient at 15–25 °C; Q_2 : 25~35 °C 温度敏感性系数 Temperature sensitivity coefficient at 25–35 °C. 下同 The same below.

RDA 分析结果表明(图 8),两个排序轴解释了 Q_1 、 Q_2 与环境因子间变化的 90.30%,其中一轴解释了变异的 87.94%,易氧化有机碳、R、 C_1 、微生物生物量碳、全氮和 SOC 与 Q_1 正相关,C/N、pH、EOC 与 Q_2 正相关,且 pH 相关性最大。SOC 的贡献度为 55.60%;DOC 的贡献度为 19.60%;pH 的贡献度为 10.30%。

3 讨论

3.1 不同生草覆盖处理对果园土壤有机碳的影响

本研究结果表明,果园套种生草(圆叶决明和平托花生)处理土壤有机碳含量均高于清耕处理,生草处理 28 年后土壤 SOC 含量增加了 19.20%~30.04%,这与多数研究结果类似^[22-24],说明生草覆盖处理通过凋落物的分解可增加土壤 SOC 含量。土壤 SOC 是土壤管理、气候、植被覆盖等各种因素综合影响下有机碳输入与输出之间动态平衡的结果^[25]。凋落物作为土壤的外源有机物,进入土壤能增加土壤有机碳含量,改变土壤理化性质。生草类型不同,凋落物输入土壤的质量和数量不同,对土壤中 SOC 的含量和稳定性影响不同。研究发现,生草区土壤有机质库容的演变以进化为主,白三叶(*Trifolium repens*)区与黑麦草(*Lolium perenne*)区平均有机质含量存在显著差异,表明随着生草年限的增加,种植白三叶改善土壤有机质的效果强于种植黑麦草^[26]。Haynes 等^[27]研究也发现,种植覆盖作物显著提升 SOC,生草年限越长有机质增加量越多。果园生草模式比传统果园栽培具有更大的固碳潜力^[28]。本研究表明,果园长期套种平托花生处理比套种圆叶决明处理有机碳高 5.18%~7.30%。这可能与两者向土壤中输入碳的质量和数量不同有关^[29]。在本试验条件下,圆叶决明地上部分生物量虽然高于平托花生,但圆叶决明的年生长周期比平托花生短,而平托花生能够保持周年覆盖,且圆叶决明冬季地上部分枯萎后被移出果园外,导致凋落物输入量低于平托花生处理^[30]。

3.2 不同生草覆盖处理对果园土壤有机碳矿化的影响

土壤有机碳的矿化受有机碳化学组成、土壤质地以及温度等多种因素的影响^[20]。本研究发现,不同处理间土壤 SOC 矿化均表现为前期矿化较快而后期显著减慢并趋于平稳,总体呈现温度越高,累积矿化量变化幅度越大的趋势,这与以往研究结果一致^[31];这是因为微生物优先利用结构简单、活性高的有机碳组分,但随着培养时间的延长,土壤中活性底物被大量消耗,微生物呼吸强度逐渐减弱,从而土壤有机碳矿化速率下降。本研究中果园生草覆盖选用适宜福建红壤区的圆叶决明、平托花生等^[32-33],这些草种在种植区域无害、生态位低、适应性强、耐性强、耗水量少、与果树无趋同性病虫害^[34]。本研究发现,套种平托花生和圆叶决明处理土壤有机碳累积矿化量、矿化速率、潜在矿化量均高于清耕处理,表明生草覆盖能够显著增加土壤碳矿化,这除了与生草处理土壤有机质含量较高有关外,生草覆盖处理的土壤 C/N、富里酸、胡敏酸的含量亦显著高于清耕处理^[18]。生草覆盖后果园土壤容重降低,空隙增加^[35],增加了土壤有机碳与空气的接触面积。生草植物根系分泌物也可以促进土壤微生物活动和土壤酶活性^[36-37],从而增强土壤微生物呼吸代谢。此外,套种平托花生处理土壤培养期间矿化量显著高于套种圆叶决明处理,累积矿化量比圆叶决明处理增加了 7.11%~36.14%,说明植被覆盖差异对土壤理化性质和酶活性产生影响,进而影响了微生物的活动水平^[38]。相关分析也表明,土壤 pH、电导率、MBC 含量与矿化速率间存在显著的相关性。土壤 SOC 矿化的一级方程模拟结果表明,生草覆盖处理的土壤潜在矿化量高于清耕处理,而矿化系数 k 低于清耕处理。矿化系数 k 值的大小反映了土壤有机碳分解的快慢程度。当矿化系数 k 较低时,意味着土壤有机碳的稳定性较高,不易被微生物分解,由此说明生草栽培在增加土壤潜在可矿化 SOC 的同时,也能够增加 SOC 在土壤中的积累,从而增强土壤的碳汇功能。

3.3 不同生草覆盖处理对果园土壤矿化温度敏感性的影响

土壤有机碳矿化温度敏感性能表征土壤碳库在气候变化条件下的响应和反馈程度,对预测全球碳循环具有重要意义^[39-40]。温度是影响土壤有机碳矿化的关键因素^[41],适宜的土壤温度对微生物的活性有促进作用,有机碳

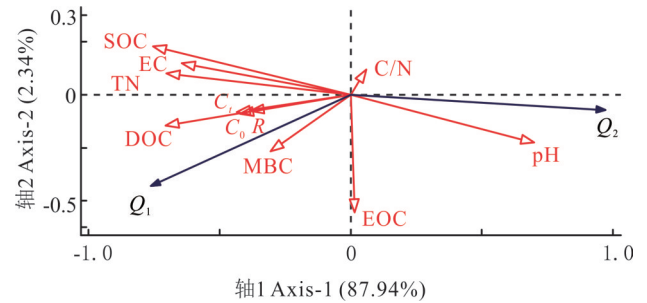


图 8 各指标间冗余分析

Fig. 8 Redundancy analysis among different indexes

的矿化速率会相对提高,温度偏高或偏低都会影响微生物对土壤有机碳的矿化作用^[42]。本研究发现,高温条件下($>25\text{ }^{\circ}\text{C}$),生草覆盖处理可以降低果园SOC矿化温度敏感性系数(Q_{10})值。分析可能由于平托花生和圆叶决明生长时会覆盖土壤表面,减小土壤温度的波动幅度,降低土壤温度对气温变化的敏感性。此外,由于不同生草覆盖间接影响土壤对温度的响应,生草凋落物输入土壤新鲜碳源量的增加、底物变化,使得 Q_{10} 值发生改变^[43]。环境因子如物理保护和矿物吸附等也会通过降低底物浓度来减弱有机碳矿化的温度敏感性。生草覆盖处理能提高土壤团聚体稳定性,增强团聚体对土壤中SOC的物理保护作用^[29]。实际上矿化本质就是土壤微生物呼吸,温度直接影响微生物的新陈代谢过程进而间接影响 Q_{10} 值^[12]。以往研究认为,有机碳质量是影响 Q_{10} 的最重要因素,且与环境温度共同决定了温度敏感性,其他因子则通过间接作用来影响温度敏感性^[12]。本研究中 Q_{10} 与环境因子的冗余分析表明,SOC的贡献度为55.60%,DOC的贡献度为19.60%,pH的贡献度为10.30%。此外,pH作为影响土壤微生物群落组成的重要因子,也可以通过改变微生物群落结构和酶活性进而影响 Q_{10} 。针对北美中部草原71个样点的研究发现,土壤pH解释了 Q_{10} 值变化的67%^[44-45]。本研究还发现,MBC、pH、EOC与 Q_{10} 正相关,且pH相关性最大。

4 结论

相对清耕处理,长期果园套种圆叶决明、平托花生处理可以显著提高土壤有机碳含量(19.20%~30.04%),且处于温度变化环境中($>25\text{ }^{\circ}\text{C}$),可降低果园土壤SOC矿化的温度敏感性,提高土壤碳库对于温度变化的稳定性。果园生草覆盖处理增加了地表植被覆盖度,减少水分蒸发,通过调控土壤pH、有机碳输入数量和质量以及其他环境因子等,作用于微生物及其底物可利用性来影响温度敏感性,其中平托花生覆盖处理较圆叶决明覆盖处理的作用效果更显著。

参考文献 References:

- [1] Batjes N H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 2016, 269(1): 61–68.
- [2] Pan G X, Ding Y J, Chen S T, *et al.* Exploring the nature of soil organic matter from humic substances isolation to SOMics of molecular assemblage. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5): 451–470.
潘根兴, 丁元君, 陈硕桐, 等. 从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质. *地球科学进展*, 2019, 34(5): 451–470.
- [3] Zhang S. Modelling the temperature sensitivity of global soil organic carbon mineralization. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.
张帅. 全球土壤有机碳矿化温度敏感性模拟研究. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [4] Yang S. Temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization in temperate forests in Northeast China. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2021.
杨山. 东北温带森林土壤有机碳矿化温度敏感性研究. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021.
- [5] Weng B Q, Ying Z Y, Huang Y B, *et al.* Study on construction and application of comprehensive utilization mode and ecological rehabilitation of empoldered red soil mountains in Northern Fujian. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 147–150.
翁伯琦, 应朝阳, 黄毅斌, 等. 闽北山区红壤丘陵开发地生态恢复与综合利用模式构建及其应用研究. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 147–150.
- [6] Minarro M, Dapena E. Effects of groundcover management on ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in an apple orchard. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(2): 111–117.
- [7] Weng B Q, Huang Y B, Ying Z Y, *et al.* The technology and efficient analysis of ecological orchard in red soil hills. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(12): 465–470.
翁伯琦, 黄毅斌, 应朝阳, 等. 红壤山地生态果园开发及成效分析. *中国农学通报*, 2006, 22(12): 465–470.
- [8] Huang J X, Xiong D C, Liu X F, *et al.* Effects of warming on soil organic carbon mineralization: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 12–24.
黄锦学, 熊德成, 刘小飞, 等. 增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述. *生态学报*, 2017, 37(1): 12–24.
- [9] Lu W. Mineralization and kinetic characteristics of organic carbon in long-term fertilized yellow soil at different temperatures.

Guiyang: Guizhou University, 2019.

卢韦. 不同温度下长期施肥黄壤有机碳的矿化及动力学特征. 贵阳: 贵州大学, 2019.

- [10] Wu J H, Pan J J, Ge X J, *et al.* Variations of soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity under different land use types. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 130–135.
邬建红, 潘剑君, 葛序娟, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 130–135.
- [11] Zhu R H, Zheng Z C, Li T X, *et al.* Dynamics of soil organic carbon mineralization in tea plantations converted from farmland at Western Sichuan, China. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0185271.
- [12] Chen Z X, Zhang C, Li Q, *et al.* Mechanism underlying temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(9): 2575–2584.
陈滇雄, 张超, 李全, 等. 土壤有机碳分解温度敏感性的影响机制研究进展. *应用生态学报*, 2023, 34(9): 2575–2584.
- [13] Wang D, Lü Y L, Xu L, *et al.* Impact of changes in vegetation types on soil C mineralization and associated temperature sensitivity in the Changbai Mountain forests of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6373–6381.
王丹, 吕瑜良, 徐丽, 等. 植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响. *生态学报*, 2013, 33(19): 6373–6381.
- [14] Chen X F, Liu M, Jiang C Y, *et al.* Mineralization of soil organic carbon and its sensitivity to temperature in soil aggregates, relative to particle size in red paddy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1118–1127.
陈晓芬, 刘明, 江春玉, 等. 红壤性水稻土不同粒径团聚体有机碳矿化及其温度敏感性. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1118–1127.
- [15] Wang D. Study on soil carbon mineralization and its temperature sensitivity in the forest vertical transect of Changbai Mountain. Chongqing: Southwest University, 2014.
王丹. 长白山垂直样带森林土壤碳矿化及其温度敏感性研究. 重庆: 西南大学, 2014.
- [16] Gao J L, Wang J J, Bai Y, *et al.* The influence of the grain for green project on climate change in Shaanxi Province and its driving mechanism. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2): 150–157.
高建伦, 王晶晶, 白玥, 等. 退耕还林工程对陕西省气候的影响及其驱动机制. *水土保持研究*, 2025, 32(2): 150–157.
- [17] Cao Q, Shen Y Y, Wang Z K, *et al.* Effects of living mulch on soil physical and chemical properties in orchards: a review. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(8): 180–188.
曹铨, 沈禹颖, 王自奎, 等. 生草对果园土壤理化性状的影响研究进展. *草业学报*, 2016, 25(8): 180–188.
- [18] Wang Y X, Wang F, Weng B Q, *et al.* Effect of sod cultivation on mineralization of soil organic carbon in nectarine orchards. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(6): 86–92.
王义祥, 王峰, 翁伯琦, 等. 生草栽培对油桃园土壤有机碳矿化的影响. *草业学报*, 2013, 22(6): 86–92.
- [19] Bao S D. *Agrochemical analysis of the soil (the third edition)*. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
鲍士旦. *土壤农化分析(第3版)*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Li J, Du X R, Mo X L, *et al.* Characteristics of soil organic carbon mineralization and its influencing factors under different land use types in karst areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(2): 730–742.
黎俊, 杜馨如, 莫小亮, 等. 喀斯特不同土地利用方式土壤有机碳矿化特征及其影响因素. *生态学报*, 2025, 45(2): 730–742.
- [21] Li S J, Qiu L P, Zhang X C. Mineralization of soil organic and its relations with soil physical and chemical properties on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1217–1226.
李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系. *生态学报*, 2010, 30(5): 1217–1226.
- [22] Yang L, Li W Y, Luo J L, *et al.* Effects of plastic film mulching and natural grass growing on soil nutrients, pH, water content and temperature in peach orchard. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2024, 36(12): 2719–2726.
杨乐, 李文杨, 骆建莉, 等. 地膜覆盖和自然生草对桃园土壤养分、pH及水热的影响. *浙江农业学报*, 2024, 36(12): 2719–2726.
- [23] Xue T T, Cheng C Y, Yang F, *et al.* Effect of organic mulching practices on soil properties in vineyards: A review. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 206–218.
薛婷婷, 程春颖, 杨帆, 等. 葡萄园有机覆盖措施对土壤特性的影响研究进展. *中国农业大学学报*, 2024, 29(6): 206–218.
- [24] Huang G H, Ning X Y, Lu Y P, *et al.* Research progress on carbon sequestration potential and its effects based on grass

- planting model in the orchard. *Northern Horticulture*, 2023(14): 146–153.
- 黄国华, 宁心怡, 卢玉鹏, 等. 基于果园生草模式的固碳潜力及影响研究进展. *北方园艺*, 2023(14): 146–153.
- [25] Tai J C, Yang H S, Fan F, *et al.* Effects of manual sowing methods of *Medicago sativa* and *Bromus inermis* on the distribution and content of soil organic carbon and nitrogen. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(6): 41–45.
- 邵继承, 杨恒山, 范富, 等. 播种方式对紫花苜蓿+无芒雀麦人工草地浅剖面土壤C、N分布及储量的影响. *草业学报*, 2010, 19(6): 41–45.
- [26] Li H K, Zhang G J, Zhao Z Y, *et al.* Effects of interplanted herbage on soil properties of non-irrigated apple orchards in the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(2): 32–39.
- 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 生草对黄土高原旱地苹果园土壤性状的影响. *草业学报*, 2007, 16(2): 32–39.
- [27] Haynes R J, Goh K M. Some effects of orchard soil management on sward composition, levels of available nutrients in the soil and leaf nutrient content of nature ‘Golden Delicious’ apple trees. *Scientia Horticulturae*, 1980, 13: 15–25.
- [28] Montanarella L, Pennock D J, Mckenzie N, *et al.* World’s soils are under threat. *Soil Discussions*, 2016, 2(2): 79–82.
- [29] Wang Y X. Characteristics of organic carbon stock and carbon fixation capacity in orchard soils by different managing measures. Fujian: Fuzhou Agriculture and Forestry University, 2011.
- 王义祥. 不同经营措施下果园土壤有机碳库特性及固碳潜力研究. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [30] Luo X H, Zhan J, Wang Y X, *et al.* Soil & water conservation function and comprehensive benefits of intercropping forage in eroded fruit garden. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(5): 729–734.
- 罗旭辉, 詹杰, 王义祥, 等. 侵蚀果园长期植草的生态效益分析. *草地学报*, 2011, 19(5): 729–734.
- [31] Cao Y X, Cheng M, Wen Y L. Effects of iron addition on soil organic carbon mineralization characteristics under different vegetation types in Mount Luya. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2024, 30(1): 18–25.
- 曹亚鑫, 程曼, 文永莉. 芦芽山不同植被类型下土壤有机碳矿化特征及其对铁添加的响应. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(1): 18–25.
- [32] Zheng Z D, Huang Y B, Weng B Q, *et al.* Studies on the comprehensive development of hilly land in Fujian—I. Effects of different planting manners on the orchard ecosystem. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 155–157.
- 郑仲登, 黄毅斌, 翁伯奇, 等. 福建山地综合开发中红壤保育研究——I. 不同垦殖方式对果园生态系统的影响. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 155–157.
- [33] Huang Y B, Ying C Y, Zheng Z D, *et al.* Studies on the ecological forages and its utilization in ecological orchard. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001(3): 52–55.
- 黄毅斌, 应朝阳, 郑仲登, 等. 生态牧草筛选及其在生态果园应用的研究. *中国生态农业学报*, 2001(3): 52–55.
- [34] Ma G H, Zeng M, Wang Y Y, *et al.* Research progress on orchard sod culture. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(7): 273–277.
- 马国辉, 曾明, 王羽玥, 等. 果园生草制研究进展. *中国农学通报*, 2005, 21(7): 273–277.
- [35] Jiao X Y. Study on the cultivation techniques and benefits of raw grass in orchards. *Fruit Growers’ Friend*, 2024(7): 70–73.
- 焦秀颖. 果园生草栽培技术与效益研究. *果农之友*, 2024(7): 70–73.
- [36] Zhang X H, Xin H M. Nutrient and soil enzyme activities of pear orchard as affected by planting herbage. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(8): 85–88.
- 张喜焕, 辛贺明. 生草栽培对梨园土壤养分及土壤酶活性的影响. *河南农业科学*, 2012, 41(8): 85–88.
- [37] Guan G, Guo F P, Guo D D, *et al.* Effects of raw grass cultivation on soil biological properties and root exudation of Gannan navel orange. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(5): 216–226.
- 管冠, 郭富鹏, 郭等等, 等. 生草栽培对赣南脐橙土壤生物学性质及根系分泌物的影响. *江苏农业科学*, 2023, 51(5): 216–226.
- [38] Hu F, Yang Y L, Ni Z J, *et al.* Effects of sod culture on fruit quality and soil in peach orchard. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2020, 47(3): 31–37.
- 胡枫, 杨熠路, 倪照君, 等. 生草对桃园土壤及桃果实品质的影响. *江苏林业科技*, 2020, 47(3): 31–37.
- [39] Liu Y H, Du X L, Huang J X, *et al.* Effect of environmental factors on mineral soil respiration: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10): 2835–2844.
- 刘源豪, 杜旭龙, 黄锦学, 等. 环境因子对矿质土壤呼吸影响的研究进展. *应用生态学报*, 2023, 34(10): 2835–2844.
- [40] Alster C J, Weller Z D, Vonfischer J C. A meta-analysis of temperature sensitivity as a microbial trait. *Global Change Biology*, 2018, 24(9): 4211–4224.

- [41] Song K C, Wang G H, Xu D M, *et al.* Soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in desert steppe with different enclosure ages. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(3): 453–459.
宋珂辰, 王国会, 许冬梅, 等. 不同封育年限荒漠草原土壤有机碳矿化及温度敏感性. *生态环境学报*, 2021, 30(3): 453–459.
- [42] Mi J, Li J, Chen D, *et al.* Predominant control of moisture on soil organic carbon mineralization across a broad range of arid and semiarid ecosystems on the Mongolia plateau. *Landscape Ecology*, 2015, 30(9): 1683–1699.
- [43] Wang Q, He T, Liu J. Litter input decreased the response of soil organic matter decomposition to warming in two subtropical forest soils. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 33814.
- [44] Delgado-Baquerizo M, Eldridge D J, Ochoa V, *et al.* Soil microbial communities drive the resistance of ecosystem multifunctionality to global change in drylands across the globe. *Ecology Letters*, 2017, 20(10): 1295–1305.
- [45] Craine J, Spurr R, Mclauchlan K, *et al.* Landscape-level variation in temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(3): 373–375.