北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

绿肥覆盖对柑橘园土壤水热动态特征的影响

闫桂菀 董文斌 韦彩会 张宇亭 俞月凤 梁海 李忠义 唐红琴 莫永诚 邓羽松 何铁光

Effects of grass manure cover on soil hydrothermal dynamic in citrus orchard

Yan Guiwan, Dong Wenbin, Wei Caihui, Zhang Yuting, Yu Yuefeng, Liang Hai, Li Zhongyi, Tang Hongqin, Mo Yongcheng, Deng Yusong, He Tieguang

引用本文:
闫桂菀, 董文斌, 韦彩会, 张宇亭, 俞月凤, 梁海, 李忠义, 唐红琴, 莫永诚, 邓羽松, 何铁光. 绿肥覆盖对柑橘园土壤水热动态特征的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(8):68–79. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250290
Yan Guiwan, Dong Wenbin, Wei Caihui, Zhang Yuting, Yu Yuefeng, Liang Hai, Li Zhongyi, Tang Hongqin, Mo Yongcheng, Deng Yusong, He Tieguang. Effects of grass manure cover on soil hydrothermal dynamic in citrus orchard[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8):68–79. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250290

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250290

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

坝上高原不同植被类型覆盖下土壤水分含量对降雨的动态响应

Dynamic response of soil moisture content to rainfall under different vegetation cover types on the Bashang Plateau, northwestern Hebei Province of northern China

北京林业大学学报, 2023, 45(5): 106–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220220

梯田与间作对橡胶林土壤水分入渗特征的调控效应

Regulatory effects of terracing and intercropping on soil moisture infiltration characteristics in rubber plantations

北京林业大学学报, 2026, 48(1): 144–154. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250229

额济纳绿洲不同土壤水盐条件多枝柽柳对胡杨种群分布的影响

Effects of *Tamarix ramosissima* on the distribution of *Populus euphratica* in various soil water and salinity environments in the Ejina Oasis, Inner Mongolia of northern China

北京林业大学学报, 2023, 45(3): 11–20. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210317

间伐强度和水分管理对毛白杨人工林土壤水分时空特征的短期影响

Short–term effects of thinning intensity and water management on the spatiotemporal characteristics of soil moisture in *Populus tomentosa* plantations

北京林业大学学报, 2026, 48(3): 26–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250329

园林绿化废弃物覆盖对城市绿地土壤肥力影响

Effects of landscaping waste mulching on soil fertility of urban green space

北京林业大学学报, 2021, 43(10): 110–117. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200402

冬奥会崇礼赛区5种人工林枯落物及土壤水文特征

Hydrological characteristics of litter and soil of five types of plantation configuration patterns in the Chongli Competition District of Winter Olympic Games

北京林业大学学报, 2022, 44(4): 66–75. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210295

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250290

绿肥覆盖对柑橘园土壤水热动态特征的影响

闫桂菀[1]　董文斌[2]　韦彩会[2]　张宇亭[3]　俞月凤[2]　梁　海[2]　李忠义[2]
唐红琴[2]　莫永诚[2]　邓羽松[1]　何铁光[2]
（1. 广西大学林学院，广西 南宁 530004；2. 广西农业科学院农业资源与环境研究所，广西耕地保育重点实验室，广西 南宁 530007；3. 西南大学资源环境学院，重庆 400715）

摘要:【目的】探究柑橘园绿肥覆盖对土壤水热动态特征及降雨响应的调控效应，以期为柑橘园绿肥选择与雨养节水管理提供科学依据。**【方法】**以广西农业科学院武鸣里建基地柑橘园为试验区，设置 4 种绿肥覆盖处理：光叶苕子（T1）、肥田萝卜（T2）、平托花生（T3）、光叶苕子 + 肥田萝卜 + 宽叶雀稗混播（T4），以清耕（CK）为对照。于 2025 年 2—6 月连续监测 0 ~ 20 cm 与 20 ~ 40 cm 土层的土壤水分与温度变化，结合典型降雨事件及柑橘产量、果实品质指标，分析了不同绿肥覆盖处理对土壤水热动态、降雨响应特征及柑橘生长的影响。**【结果】**（1）绿肥覆盖能够显著改变土层水分动态。T3 处理中，0 ~ 20 cm 土层含水量短期含水量骤增，呈现“锯齿状波动”，范围为 2.66% ~ 43.61%，表层保水最强；T2 处理中，20 ~ 40 cm 土层的含水量维持在 5.12% ~ 33.53%，表现为“上干下湿”的深层补水优势。（2）相较于 CK，绿肥覆盖在缓冲土层温度波动方面作用显著，其中 T4 处理在浅层土壤早春保温、深层土壤夏季增温方面效果最佳。（3）绿肥覆盖显著改善了降雨事件下柑橘园土壤水分状况。小雨和中雨条件下分别发挥保湿缓蒸作用和延缓退水作用，暴雨条件下则促进降雨入渗和深层蓄水。其中，暴雨条件下 T2 和 T3 处理在 20 ~ 40 cm 土层表现出更高的土壤含水量，深层保水能力较强。（4）绿肥覆盖能够显著提升柑橘树单株产量并能在一定程度上改善柑橘品质，其中 T3 处理的平均单株产量最高，T4 和 T2 处理在提升部分果实品质指标方面表现更优。**【结论】**绿肥覆盖可显著优化柑橘园根区土壤水热环境，增强降雨调蓄能力，延缓水分消退速率。平托花生覆盖处理在增加柑橘产量方面效果最为显著，而肥田萝卜和混播处理可促进提升柑橘果实品质。合理选择绿肥覆盖，可同时兼顾土壤水分保持和柑橘产量提升。研究结果将为南方丘陵柑橘园绿肥科学配置、水资源利用提供实践参考。

关键词：柑橘园；绿肥处理；生草覆盖；降雨入渗；水热动态；土壤水文
中图分类号：S728.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)08−0068−12
引文格式：闫桂菀，董文斌，韦彩会，等. 绿肥覆盖对柑橘园土壤水热动态特征的影响 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(8)：68−79. Yan Guiwan, Dong Wenbin, Wei Caihui, et al. Effects of grass manure cover on soil hydrothermal dynamic in citrus orchard[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8): 68−79.

Effects of grass manure cover on soil hydrothermal dynamic in citrus orchard

Yan Guiwan[1]　Dong Wenbin[2]　Wei Caihui[2]　Zhang Yuting[3]　Yu Yuefeng[2]　Liang Hai[2]
Li Zhongyi[2]　Tang Hongqin[2]　Mo Yongcheng[2]　Deng Yusong[1]　He Tieguang[2]
(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;
2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Guangxi Key Laboratory of Cultivated Land Conservation, Nanning 530007, Guangxi, China;
3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

收稿日期: 2025−07−31　**修回日期:** 2026−05−07
基金项目: 国家绿肥产业技术体系建设项目（CARS-22），国家重点研发计划子课题（2023YFD1902801），科技先锋队“强农富民”“6 个一”专项行动（桂农科盟 202413）。
第一作者: 闫桂菀。主要研究方向：土壤侵蚀与养分。Email: wandeline0322@outlook.com　地址：530004 广西南宁市西乡塘区大学东路 100 号广西大学林学院。
责任作者: 董文斌，副研究员。主要研究方向：绿肥品种选育、生产及利用。Email: dongwenbin@gxaas.net　地址：530007 广西南宁市西乡塘区大学东路 174 号广西农科院资环所。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract:［**Objective**］To investigate the regulation effects of green manure cover on soil water and heat dynamic characteristics and rainfall response in citrus orchards, with the aim of providing a scientific basis for green manure selection and rainfed water-saving management.［**Method**］Using a citrus orchard at the Lijian Experimental Base of the Guangxi Academy of Agricultural Sciences in Wuming, Guangxi, as the study site, four green manure cover treatments were established: *Vicia villosa* (T1), *Raphanus sativus* (T2), *Arachis pintoi* (T3) and mixed sowing (T4). Soil moisture and temperature in the 0−20 cm and 20−40 cm layers were continuously monitored from February to June 2025. Clean tillage (CK) was used as the control. Soil moisture and temperature changes in the 0−20 cm and 20−40 cm soil layers were continuously monitored from February to June 2025. By integrating data on typical rainfall events with citrus yield and fruit quality indicators, this study analyzed the effects of different green manure cover treatments on soil water and heat dynamics, rainfall response characteristics, and citrus growth.［**Result**］(1) Grass manure cover significantly altered the soil moisture dynamics. Under the T3 treatment, soil moisture in the 0−20 cm layer exhibited a "sawtooth-like" fluctuation, ranging from 2.66%−43.61%, indicating the strongest water retention in the surface layer. Under the T2 treatment, soil moisture in 20−40 cm layer was maintained within 5.12%−33.53%, showing a clear advantage in deep-layer water replenishment, characterized by a "dry upper layer and moist lower layer" pattern. (2) Compared with the CK treatment, grass manure cover played a significant role in buffering temperature fluctuations. Among the treatments, T4 showed the best performance in maintaining higher temperatures in early spring and cooling in summer.Compared with the clean tillage treatment, green manure cover played a significant role in buffering soil temperature fluctuations. Among the treatments, T4 showed the best performance in maintaining higher temperatures in early spring and warming the lower soil layer during summer. (3) Green manure mulch significantly improved soil moisture conditions in citrus orchards during rainfall events. Under light and moderate rainfall conditions, it primarily helped retain moisture and slow evaporation, while under heavy rainfall conditions, it promoted rainfall infiltration and deep-layer water storage. Specifically, the T3 and T2 treatments exhibited higher soil moisture content in the 20−40 cm soil layer, demonstrating stronger deep-layer water retention capacity. (4) Green manure coverage significantly increased single-tree citrus yield and improved certain fruit quality traits, with the T3 treatment achieving the highest average yield.［**Conclusion**］Green manure cover can significantly improve the soil hydrothermal environment in the root zone of citrus orchards, enhances rainfall regulation and storage capacity, and slow the rate of soil moisture depletion. Citrus yield and fruit quality varied among different green manure coverage treatments. *Arachis pintoi* was the most effective for yield improvement, *Raphanus sativus* and mixed coverage performed better in enhancing fruit quality. Proper selection of green manure coverage can simultaneously optimize soil moisture retention and citrus production. These findings provide practical guidance for the scientific selection of green manure and efficient water resource management in citrus orchards in the hilly regions of southern China.

Key words: citrus orchards; green manure management; grass manure cover; rainfall infiltration; water-heat dynamic; soil hydrology

土壤水分是干旱地区水文过程的关键调控因子，直接影响植物根系吸水、养分吸收与运输、蒸腾作用等关键生理过程[1−2]。土壤水分的补充依赖于降雨，而其损失主要通过土壤表面蒸发和植物蒸腾耗水实现[3]。当植物的水分消耗超过自然降水的补充时，土壤水分短缺将诱发水分胁迫，进而影响植物生长发育，并可能导致农作物的损失，制约农业生产力[4−5]。土壤水分动态受多重因素共同影响，包括降雨特征、气温[6]、植被类型[7]以及土层深度[8]等。植被对降雨的响应模式会随气温变化、降雨事件差异及年降雨量的波动而有所不同。在农业生态系统中，根区水热协同平衡是保障作物正常生长发育的核心环境条件，保障土壤水分的有效供给是实现作物高产、农业高效与可持续发展的基础。

经果林是我国农业的重要组成部分，在创造显著经济效益的同时，兼具涵养水源、调节区域微气候和维护生物多样性等生态功能[9]。该生态系统对土壤水分的依赖贯穿其整个生长周期，具有关键需水期明确和长期性等特点[10]。柑橘（*Citrus reticulata*）作为经果林的主要代表树种之一，属深根系木本植

物，其果园土壤水分的调控机制复杂且特殊，但也更易受到季节性干旱或降雨分配不均的影响[11–12]。我国柑橘园主要分布于亚热带湿润气候地区，尽管年降水量充足，但季节降雨分配失衡与极端降水事件频发导致土壤水分剧烈波动。水热同期虽有利于植物生长，但土壤温度的剧烈变化常与水分胁迫耦合，共同制约当地柑橘园的稳产、优质和可持续发展[9]。传统柑橘园清耕管理模式使地表长期裸露，加剧土壤结构退化和水热环境恶化，从而导致生产力下降[13]。绿肥覆盖作为柑橘园的一项节水保墒的重要管理措施，通过地面遮荫和增加地表生物量，可有效稳定土壤结构，协调水、肥、气、热的供应[14]。绿肥品种因其生物学特性的差异又可分为豆科(Fabaceae)、禾本科(Poaceae)和十字花科(Brassicaceae)绿肥[15]。研究[16]表明，不同种类绿肥的根系能够改善土壤结构，促进土壤养分积累；而覆盖层可减缓雨水对地表的直接侵蚀，减少土壤水分直接蒸发，促进降雨入渗。然而，现有研究[17]更多集中在温带经果林，或以坡耕地地表径流为重点，缺乏不同绿肥覆盖模式下壤中流的分布规律研究，对降雨事件的实时动态响应也尚未系统量化。因此，深入探究绿肥覆盖对柑橘园根区土壤水热动态特征的调控效应，对于优化柑橘园管理，促进土壤生态系统健康，推动产业可持续发展具有重要的理论和应用价值。

本研究拟以亚热带柑橘园为研究对象，针对该地区降雨集中、暴雨频发、季节性干旱突出的气候特点，设置清耕和 4 种绿肥覆盖处理，通过原位高频监测系统，系统研究柑橘园不同绿肥覆盖下的土壤水热动态特征，探讨不同绿肥覆盖下不同降雨事件中根区土壤水分的入渗、再分配与消退的动态响应过程，揭示绿肥覆盖在缓解水分胁迫的作用机制。研究结果将明确不同绿肥草种在土壤水热调控以及对降雨响应的差异化响应规律，为亚热带柑橘园土壤水分精准调控、抗旱节水栽培及生态覆盖模式优选提供理论依据和技术支撑，进而推动柑橘园土壤的可持续利用与生态管理水平的提升。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于广西农业科学院武鸣里建基地内柑橘园（22°59′58″ ~ 23°33′16″N，107°49′26″ ~ 108°37′22″E，图 1），该区地处亚热带季风气候区，光热充足，雨量充沛，夏湿冬干，植物种类繁多；年均气温 21.7 ℃，年降雨量 1 100 ~ 1 700 mm，年均相对湿度 80%，气候温和，霜少无雪；土壤类型主要为红壤，土壤理化性质[14]如表 1 所示。

1.2 试验设计

试验区选址于平坦地形，地面无明显坡度。每个试验小区的规格为 6 m × 4 m，每小区种植 6 株果树，株距 2 m，行距 4 m，且所有小区的管理措施保持一致。为确保试验结果的可靠性，试验采用完全随机区组设计，每个处理设置 3 个重复。绿肥的种植自 2020 年开始，依据绿肥适生性、功能互补与本区可得性，并结合研究区酸性红壤与南亚热带气候，设

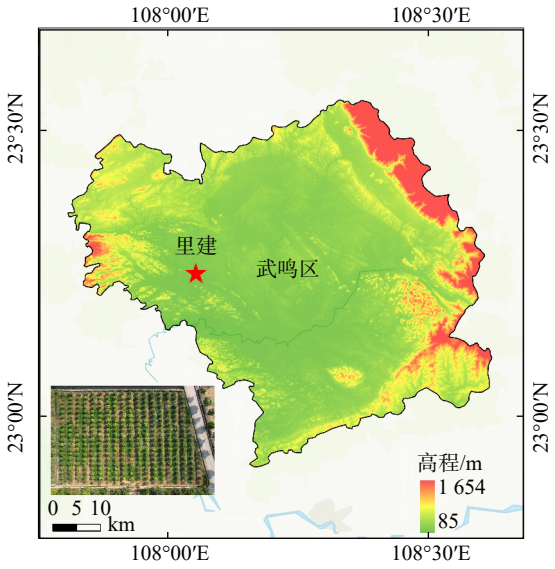


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

表 1 不同绿肥覆盖处理下的土壤基本理化性质

Tab. 1 Basic physical and chemical properties of soil under different grass cover treatments

处理	pH	土壤密度/（g·cm^{-3}）	饱和导水率/（cm·s^{-1}）	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	土壤有机碳/（g·kg^{-1}）	溶解有机碳/（mg·L^{-1}）	土壤机械组成/%		
									黏粒	粉粒	砂粒
CK	5.63c	1.38a	0.89c	46.84c	34.98b	11.86bc	15.66c	27.40c	37.6b	35.6a	26.8b
T1	5.70bc	1.30a	0.88c	47.96c	37.09ab	10.871c	21.82a	66.37a	38.0b	33.0a	27.7a
T2	5.93ab	1.27a	1.94a	52.91ab	36.25ab	16.66ab	15.79c	23.49c	39.0b	34.9a	26.2b
T3	6.06a	1.33a	1.42ab	49.75b	37.26a	12.49b	18.02b	45.50b	40.8a	36.7a	22.5c
T4	5.84b	1.28a	1.24b	53.05a	35.83ab	17.22a	19.19ab	25.51c	39.9b	35.5a	24.6b

注：CK. 清耕；T1. 光叶苕子覆盖；T2. 肥田萝卜覆盖；T3. 平托花生覆盖；T4. 混合覆盖。不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异（$P < 0.05$）。

置 4 种绿肥覆盖处理：T1 处理为直立豆科植物光叶苕子（*Vicia villosa*），T2 处理为十字花科植物肥田萝卜（*Raphanus sativus*），T3 处理为匍匐豆科植物平托花生（*Arachis pintoi*），T4 处理为混播（光叶苕子 + 肥田萝卜 + 宽叶雀稗（*Paspalum wettsteinii*）），其中宽叶雀稗为热带禾本科植物，将清耕处理设为对照（CK）。T1 处理光叶苕子每个小区播种量 180 g，T2 处理肥田萝卜每个小区 360 g。T3 处理平托花生为多年生植物，2020 年定植后尽量不补播。T4 处理混播小区为光叶苕子 60 g、肥田萝卜 120 g 和宽叶雀稗 60 g。每年 10 月，在果树行间撒播生草种子并覆盖薄膜以保证发芽率。所有果树施肥量参考当地果农的施肥习惯，并保持一致的管理方式。待春季绿肥自然枯死后将枯落物原位覆盖在地面上。

1.3　研究方法

围绕“不同绿肥覆盖处理如何调控和响应土壤水分与温度”这个核心的科学问题，本文通过采集研究区气象数据，连续监测不同绿肥处理小区的土壤水分和温度的变化，并细分降雨过程中土壤水分和温度动态响应特征，最后结合小区产量和果实理化性质，系统探讨不同绿肥处理对柑橘生长的影响。

1.3.1　气象长期定点监测

试验区的降雨量（日降雨量、累积降雨量）、温度等气象数据来自广西壮族自治区农科院基地智能监测平台（http://sa.tcloudit.com/DefaultMain.html?p=100），由基地内部监测站提供。每 1 h 监测 1 次，统计研究期间降雨量和气温的动态变化特征以及典型降雨事件，为后续分析土壤水分和温度变化提供必要的气候背景。

1.3.2　土壤水分和温度监测

为了定量评估不同绿肥覆盖下土壤水热动态变化及其垂向分布特征，在每个小区中心埋设两根土壤水分温度传感器，分别监测 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层含水量，共布设 10 根传感器。安装完成后，将挖出的土壤分层小心回填到原土壤剖面中，进行人工压实，保持回填后与原状土相同。在小区保护行布设数据采集器（HM-TS200），连续监测绿肥生长季 2025 年 2—6 月的土壤含水量（%）和温度（℃），监测频率为 30 min/次，确保能够快速地采集土壤水分和温度的变化数据，以获取不同处理下土壤水分和温度的连续动态变化趋势。同时，为进一步分析不同绿肥覆盖处理对土壤温度的影响，基于监测数据统计两个土层的平均温度，并分析各处理土壤温度变化特征。

基于上述试验区气象监测数据，选取具有代表性的降雨事件，分析不同绿肥覆盖处理下土壤含水量和温度在降雨过程中的动态变化特征，以及绿肥覆盖下不同土层对降雨输入的响应差异。

1.3.3　柑橘园果实品质

为了探讨不同绿肥处理对柑橘园果实产量和品质的影响，于果实成熟期进行人工采收，统计各小区柑橘单株产量。采用游标卡尺测量果实纵径和横径，称量果实总质量和果肉质量，并计算可食率（果肉质量与果实总质量百分比）；采用斐林试剂标定法测定全糖含量[18]。

1.4　数据统计

通过 Excel 2019 及 SPSS 26.0 进行统计分析处理，利用方差分析（ANOVA）分析不同处理间的差异性，图表由 Origin 2021 和 Excel 2019 完成。

2　结果与分析

2.1　柑橘园地区的气象特征

2.1.1　降雨量和气温的动态变化特征

2025 年 2—6 月期间，试验区柑橘园累计降雨量为 203 mm，其中最大日降雨量达 56.2 mm。图 2 显示，监测期间降雨时空分布不均，2—4 月降雨较少，而自 5 月起降雨频次明显增加、持续时间延长，降雨量显著增多，5 月月均日降雨量为 4.9 mm。同期，柑橘园日平均气温为 20.6 ℃，极端最高气温与极端最低气温分别为 36.2 和 9.0 ℃。2 月气温相对较低，日均气温维持在 20 ℃ 左右；自 3 月起气温逐渐升高。在 3—6 月期间，气温波动幅度增大，并且总体维持于较高水平，此阶段气候特征表现为持续性高温及昼夜温差大，表明试验区逐步由冬、春季向夏季过渡。总体来看，监测期间试验区随着气温逐渐升高，降雨量总体呈增加趋势，呈现典型的季节性水热变化特征，这为绿肥生长和土壤水热过程演变提供了环境条件。

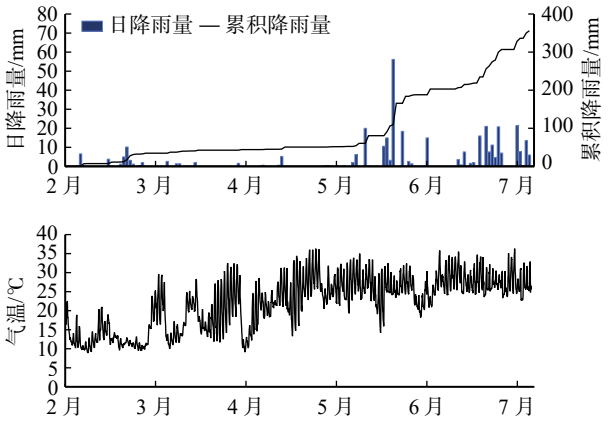


图 2　2025 年 2—6 月柑橘园降雨量和气温变化

Fig. 2　Changes in rainfall and temperature in citrus orchards, February to June 2025

2.1.2 降雨事件的统计特征

基于《降水量等级》(GB/T 28592—2012)国家标准对降雨类型的划分标准，2025 年 2—6 月柑橘园研究区域的降雨事件分类统计结果如表 2 所示。小雨事件发生频率最高，占观测期总降雨事件的 77.97%，其次为中雨(20.34%)，暴雨仅在 5 月 18 日出现 1 次(1.69%)，观测期内未记录到大雨事件，以中小强度降雨为主导。小雨、中雨以及暴雨 3 类雨型的平均持续时长介于 3.65 ~ 17.00 h，其中暴雨类型长达 17 h。以 6 h 降雨时长为分界线，分别选取了历时长和历时短的 2 场小雨、2 场中雨以及 1 场暴雨，共 5 个降雨事件，小雨事件发生在 2 月 20 日、6 月 10 日，24 h 降雨量分别为 5.0 mm、7.6 mm；中雨事件发生在 5 月 9 日、6 月 19 日，24 h 降雨量分别为 20.0 mm、11.2 mm；暴雨事件发生在 5 月 18 日，降雨量高达 56.2 mm。明确各类降雨事件时间，以便后续分析在不同降雨事件中不同绿肥覆盖下不同土层土壤含水量的动态响应变化。

表 2 柑橘园不同降雨事件分类统计

Tab. 2 Classification statistics for different rainfall events in citrus orchards

指标	分类(降雨量)				合计
	小雨(0.1 ~ 9.9 mm)	中雨(10.0 ~ 24.9 mm)	大雨(25.0 ~ 49.9 mm)	暴雨(50.0 ~ 99.9 mm)	
降雨次数	46	12	0	1	59
发生频率/%	77.97	20.34		1.69	100.00
总降雨量/mm	106.80	193.20		56.20	356.20
平均历时/h	3.65	6.00		17.00	
平均雨强/(mm·h^{-1})	0.64	2.68		3.31	

2.2 不同绿肥覆盖下土壤水分及温度的动态变化

2.2.1 绿肥覆盖下土壤含水量的变化特征

不同绿肥处理与不同土层的土壤含水量差异、气候条件密切相关(图 3)。总体来看，不同处理下，0 ~ 20 cm 土层的土壤含水量受降雨影响较大，而 20 ~ 40 cm 土层的波动幅度相对较小。清耕(CK)处理的土壤水分对降雨有明显的响应，在 0 ~ 20 cm 土层下，CK 处理下土壤含水量表现出骤增和突降的特点，明显区别于其他绿肥处理；同时，该土层含水量整体高于 20 ~ 40 cm 土层。T1 处理与 CK 具有相同的规律，即表层(0 ~ 20 cm)含水量高于下层(20 ~ 40 cm)，并且该土层下的土壤含水量高于其他处理。但 T1 在 20 ~ 40 cm 土层的波动幅度较 CK 更小，水分水平更低，整体呈现“上湿下干”的分布特征。肥

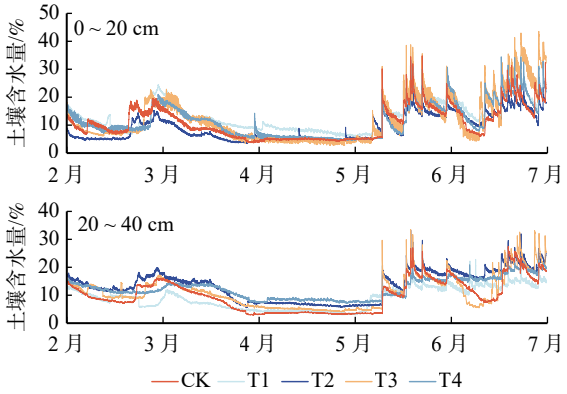


图 3 2025 年 2 月—6 月绿肥覆盖下土壤含水量变化

Fig. 3 Soil moisture changes under raw grass manure cover, February to June 2025

田萝卜(T2)处理的含水量在 0 ~ 20 cm 土层下较低，在 20 ~ 40 cm 土层下显著较其他绿肥覆盖处理具有更高的含水量，表明该绿肥处理具有深层保湿的特征。平托花生(T3)在不同土层的土壤含水量变化程度远大于其他绿肥处理，且土壤含水量均出现显著低于其他处理的现象。其中，0 ~ 20 cm 土层短期含水量骤增，呈现“锯齿状波动”，范围为 2.66% ~ 43.61%；20 ~ 40 cm 土层的含水量波动趋于缓和，但仍出现显著波动。混播(T4)处理的土壤含水量分布均匀，两个深度的水分垂直差异不显著。整体来看，不同绿肥覆盖处理下，随深度增加，降雨触发的响应幅度逐渐减弱。0 ~ 20 cm 土层的土壤含水量在 3 月前后以及 5—6 月出现几次明显的波动，相比之下，20 ~ 40 cm 土层的土壤含水量表现出相似的变化规律，但其波动幅度较小，表明深层土壤对降雨的响应较为平缓。在 4—5 月，土壤水分相对稳定、数值更为接近的条件下，T1 和 T4 处理的土壤含水量响应较为显著。

2.2.2 绿肥覆盖下土壤温度的变化特征

绿肥覆盖影响了柑橘园土壤温度的动态变化(图 4)。总体来看，各处理 0 ~ 20 cm 土层温度波动幅度均大于 20 ~ 40 cm 土层，表明表层土壤受外界环境变化影响更为明显。其中，T3 和 T4 处理的温度变化最为显著。CK 处理下，两个土层的温度变化均呈现明显的“齿轮状”和“阶跃式”波动特征，反映出清耕处理下土壤温度对环境变化的快速响应。T3 处理的温度变化趋势与 CK 处理相似，但波动幅度

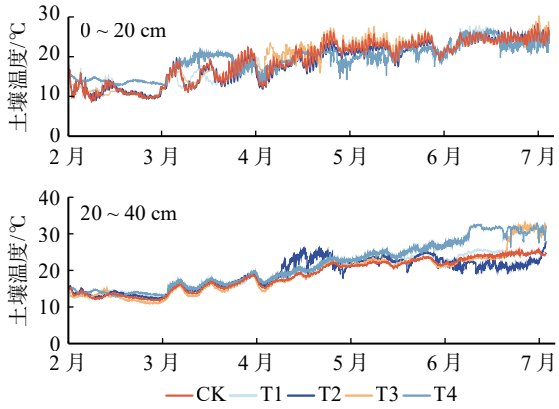


图 4　2025 年 2—6 月绿肥覆盖下土壤温度变化

Fig. 4　Soil temperature changes under raw grass manure cover, February to June 2025

更大。相比之下，T4 处理表现出较强的温度调节能力。在 2 月和 3 月，T4 处理 0 ~ 20 cm 土层温度较 CK 分别提高 2.44、2.62 ℃，20 ~ 40 cm 土层温度则分别提高 0.92、0.98 ℃。在 4 月前，T4 处理的增温效应最为明显；随着气温升高，T4 与 CK 之间的温差逐渐减小，表层土壤温度表现为幅度较小的“毛绒状”波动，而 20 ~ 40 cm 土层温度始终高于 CK 处理，显示出较好的缓冲与保温作用。

从不同处理下土壤平均温度的变化来看(图 5)，各处理土壤温度均随季节推进呈持续升高趋势，且不同绿肥覆盖处理之间的变化规律总体一致。0 ~ 20 cm 土层升温速度较快，温度变幅也更大，其中 3 月各处理温度差异最为明显，变化范围为 15.36 ~ 18.72 ℃。CK、T1 和 T2 处理的平均温度变化趋势基本一致，均表现为随季节变化逐步升高。T4 处理在 2—3 月升温幅度较大，而 3—5 月升温过程相对平缓，温度波动较小，说明混播覆盖能够根据季节变化动态调节土壤热环境，提高土壤温度稳定性。T3 处理 2 月平均温度较低，但随后维持较高温度水平，表现出一定的温度调节能力。在 20 ~ 40 cm 土层，6 月各处理间温度差异最大，变化范围为 19.36 ~ 21.92 ℃。与 T3 和 T4 相比，T2 处理在 4—6 月期间表现出较明显的不规律变化，其 4 月和 5 月平均温度较 CK 分别提高 2.50 ℃ 和 0.93 ℃，而 6 月则较 CK 降低 2.40 ℃。除 T2 外，6 月其余绿肥覆盖处理的土壤温度均高于 CK 处理，表明绿肥覆盖对深层土壤具有一定的增温效应。总体而言，绿肥覆盖通过增加地表覆盖度，能够有效缓冲土壤温度波动，增强土壤温度稳定性。其中，混播处理在早春表现出显著的保温增温作用，并在整个生长季维持较平缓的温度变化，是调节土壤热环境效果最优的处理；而平托花生则表现出较强的温度响应能力。绿肥覆盖对深层土壤温度的影响较表层更为持久，整体表现出一定的保温增温效应。

2.3　降雨过程中不同绿肥覆盖的土壤水分动态响应

2.3.1　小雨事件下的土壤水分动态变化

2 月 20 日发生历时长的小雨事件，平均降雨强度为 0.73 mm/h。降雨前，CK 处理的土壤含水量最低，且 0 ~ 20 cm 土层含水量高于 20 ~ 40 cm 土层，呈“上高下低”分布；而各绿肥覆盖处理则普遍表现为“上低下高”的分布格局。受降雨影响，各处理均有所增加，但响应特征存在明显差异(图 6)。CK 处理下土壤含水量随降雨过程呈明显波动变化。降雨初期土壤含水量较低，中后期逐渐升高，并在降雨结束后达到峰值。其中，0 ~ 20 cm 土层含水量最高达到 19.01%，随后迅速下降；20 ~ 40 cm 土层则在 2 月 21 日至 23 日期间维持较低水平，表现出较明显的垂直差异。绿肥覆盖处理均出现一定的响应滞后性，主要表现为表层快速上升、深层缓慢跟进的变化

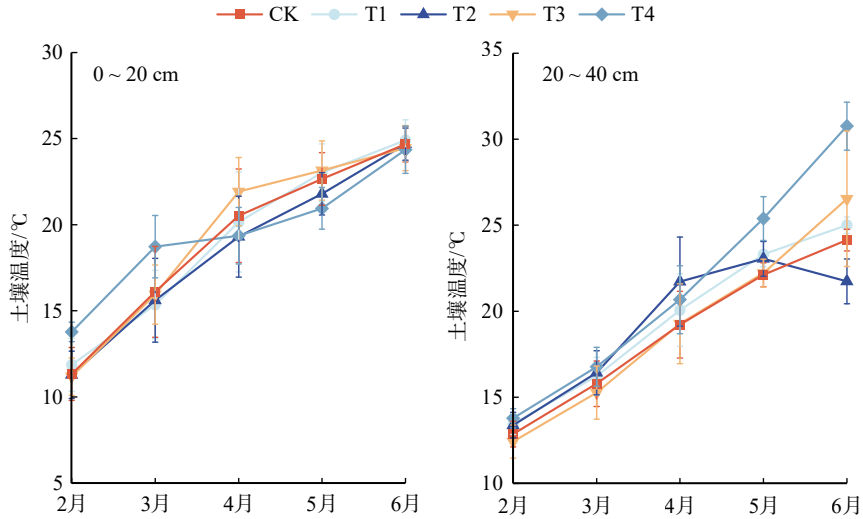


图 5　2025 年 2—6 月绿肥覆盖下土壤平均温度变化

Fig. 5　Change in average soil temperature under raw grass manure cover, February to June 2025

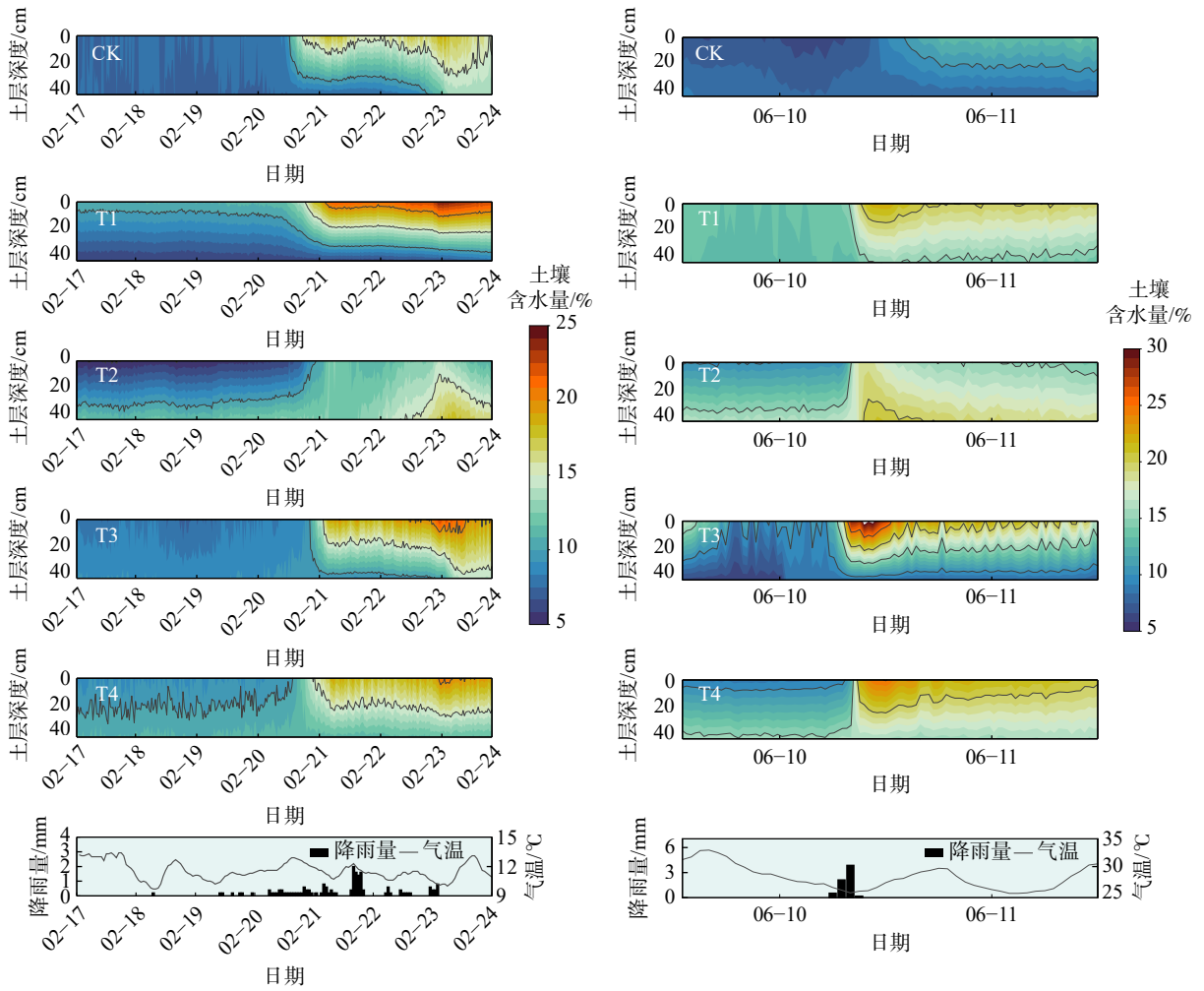


图 6 小雨事件下不同绿肥覆盖的土壤动态变化

Fig. 6 Soil dynamics of different grass manure cover under light rain events

特征。其中 T1 处理的响应时间与 CK 相近，但表层土壤含水量呈持续缓慢上升趋势，增幅明显高于 CK；20 ~ 40cm 土层仅出现小幅增加，整体仍保持“上湿下干”的分布特征。T2 处理响应最快且变化最平稳，20 ~ 40 cm 土层含水量率先增加，随后表层含水量逐渐升高。降雨后期两个土层含水量均继续小幅增加，并于 2 月 23 日达到峰值，0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层含水量差异仅为 3.34%，表明肥田萝卜覆盖具有较好的深层入渗和蓄水能力。T3 处理在降雨前表现为表层含水量高于深层，降雨后两个土层含水量均显著增加，峰值分别达到 22.72% 和 14.59%。T4 与 T3 处理对降雨的响应时间基本一致，但 T4 处理两个土层含水量呈同步、均匀上升趋势，峰值分别为 21.05% 和 12.31%，显示出较好的水分协调能力。

6 月 10 日发生历时短的小雨事件，平均降雨强度为 1.90 mm/h。与 2 月 20 日长历时低强度降雨过程类似，各处理土壤含水量均表现出一定的滞后响应特征。然而，降雨前 T1 和 T3 处理的土壤含水量呈现“上低下高”的垂直分布格局，与 2 月事件存在明显差异(图 7)。CK 处理滞后约 2 h，且土壤含水量增幅明显低于各绿肥处理，表明清耕条件下降雨入渗和蓄水能力相对较弱。相比之下，绿肥覆盖处理主要在降雨中后期出现连续响应，土壤含水量在降雨发生后 2 h 内达到峰值，随后缓慢下降并逐渐趋于稳定。其中 T3 处理 0 ~ 20 cm 土层对降雨响应最快，含水量增幅最大；T4 处理下 20 ~ 40 cm 土层含水量早于 0 ~ 20 cm 土层开始增加，达到峰值后两个土层含水量同步缓慢下降，反映出较强的水分调节能力。总体来看，在小雨条件下，绿肥覆盖能够增强土壤对降雨的响应能力，并有效减缓降雨后土壤水分下降速率，表现出较好的保水保湿作用。随着季节推进和气温升高，相较于清耕处理，绿肥覆盖能够更有效抑制土壤水分蒸发，其保湿效应进一步增强。

2.3.2 中雨事件下的土壤水分动态变化

5 月 9 日发生历时短的中雨事件，平均降雨强度为 10 mm/h。降雨前，CK 处理下土壤含水量最低；其中，CK、T2 和 T3 处理均表现为 0 ~ 20 cm 土层含水量高于 20 ~ 40 cm 土层，但 CK 处理上下层水分

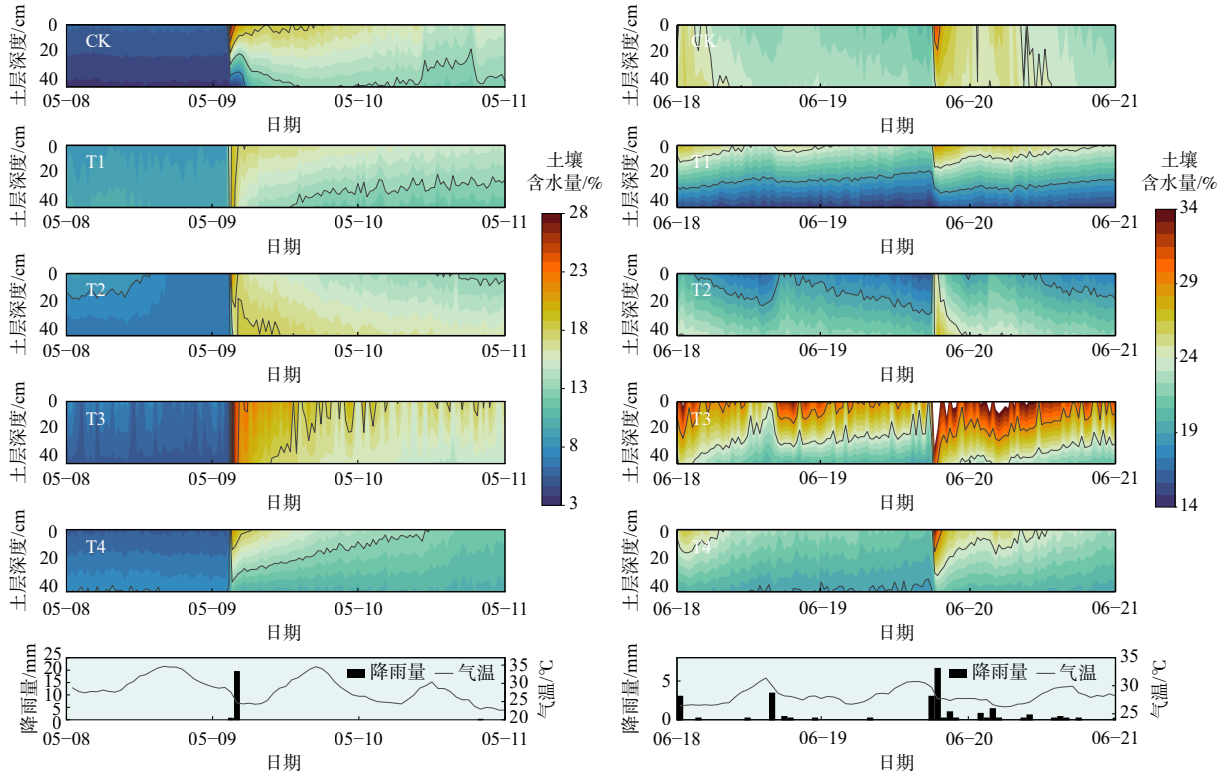


图 7　中雨事件下不同绿肥覆盖的土壤动态变化

Fig. 7　Soil dynamics of different grass manure cover under moderate rainfall events

差异最为明显(图 7)。降雨后各处理土壤含水量均快速响应降雨并在短时间内达到峰值，随后逐渐下降。与小雨事件相比，中雨事件下各处理响应时间差异明显减小，表明较高降雨强度能够快速促进水分入渗并触发不同土层的同步响应。由于气温较小雨事件明显升高，土壤蒸发和植被蒸腾作用增强，降雨结束后各处理土壤含水量均呈较快下降趋势，但绿肥覆盖处理仍能够减缓水分散失，维持较高的土壤含水量。不同绿肥处理间土壤水分变化幅度存在显著差异。其中，T3 处理的土壤含水量峰值最高，0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层含水量分别达到 31.04%、29.69%，且在后续消退过程中均保持在 20% 以上，表现出较强的蓄水保湿能力。T2 处理虽然峰值含水量低于 T3，但降雨过程中 20 ~ 40 cm 土层含水量持续保持较高水平，且水分消退过程较为平缓，表明肥田萝卜覆盖在促进深层储水的同时具有一定的缓蒸保湿作用。

6 月 19 日发生历时长的中雨事件，平均降雨强度为 1.87 mm/h。降雨后各处理土壤水分同样表现为同步上升，但与 5 月 9 日相比，CK 处理下 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层均能够快速响应降雨变化，且降雨后期几乎同步进入消退阶段，表明持续性降雨促进了降雨水向深层土壤的传输。不同绿肥处理间土壤水分动态仍存在明显差异。T1 处理出现连续性响应特征，与 2 月 20 日历时长的小雨事件较为相似，土壤含水量在降雨过程中持续增加。T2 处理对降雨的响应过程相对较短，土壤含水量较快达到峰值后进入消退阶段，但在 20 ~ 40 cm 土层仍维持较高含水量。T3 处理下两个土层均表现出最高含水量，降雨响应最为显著。T4 和 T3 处理类似，趋势相近，对降雨响应幅度较大，峰值含水量较高，其中 0 ~ 20 cm 土层含水量峰值分别为 41.40% 和 34.22%。总体来看，尽管中雨事件下高温增强了土壤水分蒸散作用，但与 5 月 9 日历时短的高强度中雨相比，历时长、低强度的中雨更有利于降雨持续入渗和土壤蓄水。与 CK 处理相比，绿肥覆盖能够延缓降雨后土壤水分下降速率，降低高温条件下的水分散失影响，提高土壤保水能力，其水分变化特征与小雨条件下表现出的保湿效应基本一致。

2.3.3　暴雨事件下的土壤水分动态变化

由图 8 可知，暴雨事件下各处理土壤含水量均表现出明显的“跳跃式”响应特征，随降雨强度增加迅速升高至峰值，随后随着降雨减弱而逐渐下降。降雨前，CK、T1 和 T2 的土壤含水量接近，T4 处理最低，T3 处理最高，各处理均表现为 0 ~ 20 cm 土层含水量高于 20 ~ 40 cm 土层的“上高下低”分布特征。降雨发生后，各处理土壤含水量几乎同步响应，但退水过程存在明显差异。CK 处理虽然能够快速响应降雨，但降雨结束后土壤含水量下降最快，表明其保水能力相对较弱。T1 和 T4 处理的响

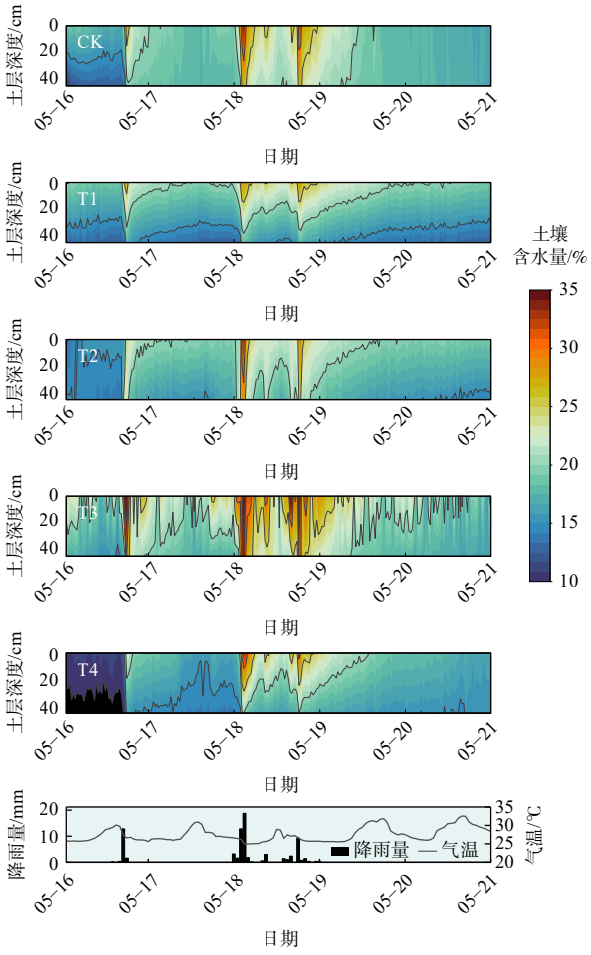


图 8 暴雨事件下不同绿肥覆盖的土壤动态变化

Fig. 8 Soil dynamics of different grass manure cover under heavy rainfall events

应规律较为相似，但降雨结束后 T1 处理 0 ~ 20 cm 土层含水量较高，而 T4 处理 20 ~ 40 cm 土层含水量较高，表明混播处理更有利于深层土壤水分保持。T2 处理表现出明显的深层蓄水特征，20 ~ 40 cm 土层含水量始终高于表层且较为稳定；T3 处理响应最早、增幅最大且退水明显滞后，在两个土层均表现为最高含水量峰值。各处理 20 ~ 40 cm 土层峰值表现为 T3(34.53%) > T2(33.31%) > CK(26.80%) > T4(20.12%) > T1(18.54%)，与 6 月 19 日中雨事件结果一致，进一步表明 T3 和 T2 处理在深层土壤蓄水方面具有明显优势。总体来看，与小雨和中雨事件相比，暴雨条件下各处理表现出更加显著的降雨响应特征：绿肥覆盖处理能够显著延缓退水过程，提高下层土壤水分含量，促进降雨向深层土壤入渗，从而增强土壤蓄水保湿能力，其中 T2 和 T3 处理在深层土壤蓄水效果最为显著。

2.4 柑橘园平均产量与果实品质分析

绿肥覆盖能够显著提高柑橘树产量(图 9)。其中，CK 处理下平均单株产量最低，仅为 16.66 kg；T1、T2 和 T4 处理的平均单株产量较为接近，且均显著高于 CK 处理；T3 处理的平均单株产量最高，且显著高于其余各处理，表明 T3 在促进柑橘增产方面效果最为明显。果实品质方面，不同处理对果实外观和内在品质的影响存在差异(表 3)。果实横径以 T4 处理最高，显著高于其他处理，而 T3 处理最低；CK 与 T2 处理的横径较为接近。各处理间果实纵径差异不显著，但 T1 处理数值相对较小。可食率方面，T1 和 T2 处理表现较好，分别较 CK 提高 2.0% 和 2.2%。此外，不同绿肥覆盖处理对果实全糖含量也产生了显著影响，其中 T4 处理全糖含量最高，T2 处理次之，较 CK 均表现出较好的增糖效果。总体来看，绿肥覆盖不仅有利于提高柑橘产量，还能在一定程度上改善果实品质，但不同绿肥处理的作用侧重点存在差异，其中 T3 更有利于增产，而 T4 和 T2 在提升部分果实品质指标方面表现更优。

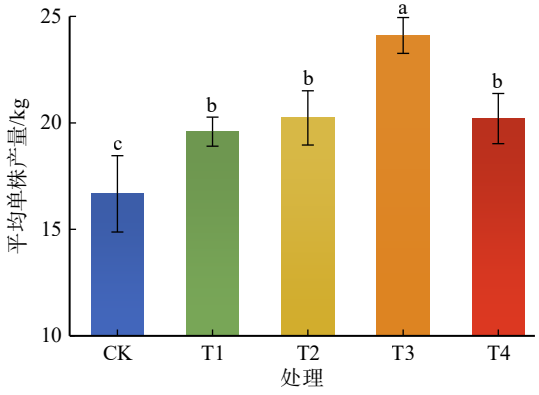


图 9 不同绿肥覆盖下 2024 年小区单株柑橘树平均产量

Fig. 9 Average yield per citrus tree in the plot under different green manure coverings in 2024

表 3 2024 年柑橘园果实品质分析

Tab. 3 Quality analysis of citrus fruit in 2024

处理	横径/mm	纵径/mm	可食率/%	全糖(g/L)
CK	76.85 ± 1.73ab	61.90 ± 0.69a	76.30 ± 0.60a	97.29 ± 3.20ab
T1	75.07 ± 1.37b	60.09 ± 1.39a	78.30 ± 0.40a	103.86 ± 12.38ab
T2	77.15 ± 1.36ab	62.48 ± 1.69a	78.50 ± 0.80a	106.34 ± 6.22a
T3	74.99 ± 2.34b	60.70 ± 0.80a	77.30 ± 1.40a	93.68 ± 3.45b
T4	79.12 ± 2.58a	62.47 ± 1.05a	76.40 ± 1.30a	107.98 ± 7.41a

3 讨　　论

柑橘园是我国重要的土地利用类型之一。然而，在当地的亚热带季风气候下，雨季分明，降雨不均匀，常出现季节性干旱，给柑橘园的可持续发展和农业生产带来挑战。已有研究发现传统耕作方式会导致地表裸露，破坏土壤结构，降低水分利用效率，从而影响柑橘园的经济效益[19]。因此，深入研究绿肥覆盖后土壤含水量对降雨的响应变化趋势，对于农业可持续发展具有重要的科学意义，并为类似地区的水资源管理和生态保护提供参考。

3.1　绿肥覆盖对土壤水热动态特征的作用机制

夏季高温多雨，处于生理落果期、果实膨大期以及夏秋梢发生期[17]。绿肥覆盖区别于传统柑橘园管理措施，能够缩小温差波动、抑制蒸发并改善土壤结构。研究结果表明，绿肥覆盖通过调节降雨入渗过程与土壤热扩散路径，有效缓解了水分胁迫与热害风险，其关键在于对水分运移路径的介入与干预。土壤水分运移受控于土壤结构、孔隙分布与表面覆盖状态[20]。清耕（CK）处理由于缺乏植被覆盖和根系调节作用，土壤结构稳定性较差，导致降雨后水分保持能力相对较弱。绿肥覆盖后地上部分可有效削弱雨滴动能、延缓径流形成，根系可能通过影响土壤孔隙结构与导水性，调节水分运移过程。平托花生（T3）和肥田萝卜（T2）处理下饱和导水率与孔隙度较清耕显著提高，可从一定程度上支持上述推断。T3 处理在表层土壤含水量显著提高，并在降雨过程中表现出较强的水分响应能力。这一现象是由于其匍匐茎叶与浅根须状根系网络。密集的须状根系分布于表层土壤，影响土壤孔隙结构；同时地上部匍匐茎叶形成连续覆盖层，共同提高了表层土壤持水能力。另外，T3 处理下保水效应集中于 0 ~ 20 cm 土层，这与柑橘树吸收根集中分布区匹配[21]。与之相反，T2 处理的深直根系形成“上干下湿”的现象，尤其在春季少雨条件下可能加剧表层水分竞争[22]。此外，研究发现绿肥覆盖还能缓冲季节温度波动，说明水分路径也是热量迁移的隐性通道[23]。混播（T4）处理在整个生长季表现出较好的温度调节能力，尤其在早春阶段具有一定的保温作用，而在气温升高后其温度波动趋于平缓。这一现象可能与混播群落在不同生育阶段的覆盖度变化有关，从而使土壤温度表现出较为稳定的变化趋势。T2 处理土层温度波动较小，表现出较好的温度稳定性，这可能与其较高的深层含水量有关。较高的土壤含水量增加了土壤热容量，从而缓冲了外界温度变化对深层土壤的影响。研究结果也发现 T3 处理的表层含水率高、热容量增大，但其温度波动幅度较大，表明该处理对环境温度变化具有较强响应能力。此外，不同绿肥覆盖对深层土壤温度的影响相对表层更为稳定，表明覆盖措施不仅改变了地表能量交换过程，还通过影响水分分布间接调节了土壤热传导过程。这说明水分过程在一定程度上参与了土壤热量调控，是水热耦合过程的重要组成部分。结合平均单株产量和果实品质指标进行关联分析，绿肥覆盖通过改善土壤水热环境，提高了果实坐果期与膨大前中期的持续供水能力，进而促进了产量提升。结合前述机制，T2 处理增强了深层土壤蓄水能力，并维持较稳定的土壤温度条件，有利于果实细胞分裂与膨大，因此表现出较大的果实纵横径且糖分积累较好；T4 处理通过优化土层间水分分布并缓解夏季高温胁迫，在促进果实膨大的同时维持了糖分积累，实现了产量与品质的协调提升；T3 处理虽然显著提高了果实产量，但由于其较高的表层含水率在无降雨时期可能加剧蒸散消耗，从而对可溶性固形物形成一定的稀释效应，造成果实糖度较低。整体而言，与传统裸地条件下的水热同向快速传递过程不同，绿肥覆盖通过减弱土壤蒸发并优化土壤水热交换过程，延缓水分消退并调节土壤热量扩散特征。在此基础上，绿肥覆盖能够将降雨过程中的入渗优势与土壤水热缓冲效应转化为稳定的水分供给条件，进而促进柑橘产量形成与品质提升。

3.2　绿肥覆盖对降雨过程的影响

降雨驱动土壤水分动态变化的驱动因素[24]。基于小雨、中雨与暴雨 5 场降雨事件来观察降雨响应特征，比较不同绿肥覆盖对土层的响应差异。总体上，绿肥覆盖显著调节了土壤对降雨的响应时序与水分保持能力，其作用随降雨类型和草种而异。在小雨事件中，绿肥覆盖处理表现出良好的蓄水效应，而清耕则迅速退水，难以维持较高的含水状态。由于清耕土壤缺乏植物根系和地表覆盖的缓冲，土壤水分容易蒸发散失，导致雨后土壤含水量快速下降，整体水分变化呈现“突升–速降”的不稳定动态[25]。而 T2 和 T4 处理均改善了降雨后的水分入渗过程，尤其 T2 处理在 20 ~ 40 cm 土层水分率先上升，体现出绿肥根系与覆盖层能够增强垂直入渗能力。T4 处理表现出较好的深层保水能力和层间协调性，表现出均衡的垂直调节效应，得益于多种植物根系的互补分工与协同作用，可能通过不同根系类型的互补作用改善土壤孔隙连通性，从而促进降雨向深层土壤传输[26]。中雨事件中，绿肥覆盖处理提高降雨期间的土壤含水量峰值，表现出较强的滞水能力，其中 T3 处理在两层土壤中均表现出最高峰值与最长

滞水，说明其在中雨下对水分的调蓄能力最强，与 Capri 等[27]研究结果一致。T1 处理在中雨条件下表现出连续性响应特征，其变化趋势与长历时小雨事件较为相似。这一现象的出现可能是由于与深根性覆盖植物相比，光叶苕子多为浅根系植物，根系主要分布于表层土壤，其对浅层水分变化更为敏感，从而使土壤水分动态呈现与长历时小雨事件相似的变化特征[28]。暴雨事件中，绿肥覆盖优势更为突出。清耕处理由于裸露地表造成雨滴冲刷与径流损失严重，响应快但退水亦快，表层含水量波动剧烈。T2 处理表现出显著的深层蓄水特征，20 ~ 40 cm 土层含水量始终保持较高水平，这可能与肥田萝卜较深的根系分布及其对土壤孔隙结构的改善作用有关，从而促进降雨向深层土壤运移并增强深层储水能力。T3 处理在整个降雨过程中水分响应最早、增幅最大，且滞水时间最长，反映其在暴雨冲击下具有较强的蓄水保湿和水分调蓄能力。两种处理分别从促进深层储水和增强整体蓄水能力两个方面提高了土壤对暴雨的调控能力。

绿肥覆盖能有效增强土壤对不同降雨强度的适应性，在小雨条件下缓解响应滞后，在中雨条件下促进土壤蓄水并改善层间水分配置，在暴雨条件下则减缓径流、提高蓄水效率。各处理间降雨响应差异主要受覆盖植物根系特征、覆盖度以及对土壤结构改良作用的共同影响[29]。总体来看，绿肥覆盖通过提高地表覆盖度、改善土壤结构与水分有效运移通道，有效延缓地表径流的发生并提升水分保持能力。因此，在柑橘园生态管理中可按目标合理选择和配置不同类型的生草植物，不仅有助于提升土壤对降雨的调控能力，还能实现对不同强度降雨事件的靶向适应。未来应进一步结合降雨时空分布特征与作物水分需求，优化绿肥品种与种植模式，构建更高效、稳定的水分调蓄系统，从而提升农田生态系统在气候不确定性下的韧性与可持续性。

4 结　　论

针对绿肥覆盖对柑橘园土壤水热环境及果实生产性能影响的科学问题，本研究通过连续监测不同土层的土壤含水量和温度变化，系统分析了绿肥覆盖对土壤水热动态、降雨响应特征以及柑橘产量和品质的影响。主要得到以下结论。

（1）绿肥覆盖能够改善柑橘园土壤水热环境。不同处理在土壤水分管理中的表现具有明显的层次差异。平托花生覆盖显著提高了 0 ~ 20 cm 土壤含水量，肥田萝卜覆盖处理表现为“上干下湿”的含水量特征，促进水分向 20 ~ 40 cm 入渗，混播处理则改善土壤的整体水分平衡。此外，绿肥覆盖改善了土壤热环境，可有效减缓土壤温度波动并增强保温效应，其中混播处理表现出最佳的温度调节能力，而绿肥覆盖对深层土壤温度的影响较表层更为持久。

（2）不同降雨条件下，绿肥覆盖均能提高土壤降雨响应能力和蓄水保湿能力。小雨条件下主要表现为保湿缓蒸作用，中雨条件下主要表现为延缓退水作用，暴雨条件下绿肥覆盖能够增强深层土壤蓄水能力。其中，肥田萝卜处理深层蓄水效果最明显，平托花生处理响应最剧烈且在 2 个土层均表现为最高含水量峰值。

（3）绿肥覆盖不仅提高了柑橘产量，还改善了果实品质，其中平托花生覆盖处理增产效果最佳，而肥田萝卜和混播处理在提高果实可食率、果实大小及全糖含量等品质指标方面表现更优。

本研究为提高柑橘园水分利用效率提供了科学依据，绿肥覆盖在提高土壤水分保持和温度调控、优化降雨响应、提高柑橘产量和果实品质等方面展现出显著的生态效益，这为农业生产中的水资源管理和生态保护提供了有效的参考。

参 考 文 献

[1] Lee E, Kim S. Seasonal and spatial characterization of soil moisture and soil water tension in a steep hillslope [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 676−685.

[2] 刘继红, 崔俊芳, 郭晓军, 等. 植物根系影响土壤水分运动研究的文献计量分析 [J]. 土壤通报, 2024, 55(4): 1163−1173.
Liu J H, Cui J F, Guo X J, et al. An analysis of the influence of plant roots on soil water movement based on bibliometric studies [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(4): 1163−1173.

[3] Wang C Y, Chen J, Gu L, et al. A pathway analysis method for quantifying the contributions of precipitation and potential evapotranspiration anomalies to soil moisture drought [J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129512.

[4] Berg A, Sheffield J. Climate change and drought: the soil moisture perspective [J]. Nature Climate Change, 2018, 8(11): 1024−1029.

[5] Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Sánchez N, et al. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: assessment of the SMOS derived soil water deficit index [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 177: 277−286.

[6] 杨启红, 陈丽华, 张富, 等. 土壤水分变异对降雨和植被的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(增刊 2): 88−94.
Yang Q H, Chen L H, Zhang F, et al. Response of soil moisture variability to rainfall and vegetation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(Suppl.2): 88−94.

[7] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤−植被−水文耦合过程与机制研究进展 [J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105−2138.
Li Z K, Li X Y, Zhou S, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(11): 2105−2138.

[8] Zhu Q, Lin H. Influences of soil, terrain, and crop growth on soil

moisture variation from transect to farm scales [J]. Geoderma, 2011, 163(1): 45−54.

[9] 徐晓铮, 张会兰, 安妮, 等. 多模型耦合与 GIS 支持下的西南高山峡谷区永胜县经果林措施适宜性评价 [J]. 生态学报, 2025, 45(9): 4573−4589.
Xu X Z, Zhang H L, An N, et al. Suitability evaluation of economic-fruit forest measures in the alpine-gorge region of southwest China based on multi-model coupling and GIS [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4573−4589.

[10] 李青华, 张静, 王力, 等. 黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干化及养分变异特征 [J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 503−514.
Li Q H, Zhang J, Wang L, et al. Variation characteristics of soil desiccation and nutrients in mountain apple orchards in the loess hilly-gully region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 503−514.

[11] 杨青, 杨广斌, 赵青松, 等. 喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 9−16.
Yang Q, Yang G B, Zhao Q S, et al. Characteristics of runoff sediment yield on slopes under different rainfall and vegetation cover in karst area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 9−16.

[12] 童晨晖, 王辉, 谭帅, 等. 亚热带丘岗区经果林种植对红壤团聚体稳定性的影响 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 1012−1020.
Tong C H, Wang H, Tan S, et al. Effects of economic fruit forest planting on the stability of red soil aggregates in the subtropical hilly area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(4): 1012−1020.

[13] 段顺霞, 刘嘉元, 赵宏祥, 等. 基于 Meta 分析的黄土高原苹果园土壤改良措施效果评价 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 302−309.
Duan S X, Liu J Y, Zhao H X, et al. Evaluation of the effectiveness of soil improvement measures in apple orchards on the Loess Plateau: a meta-analysis [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 302−309.

[14] 闫桂菀, 董文斌, 李忠义, 等. 绿肥覆盖对果园土壤团聚体及有机碳组分的影响 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(12): 3427−3434.
Yan G W, Dong W B, Li Z Y, et al. Effects of green manure mulching on soil aggregates and organic carbon fractions in orchards [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(12): 3427−3434.

[15] 王泽宇, 王帅, 张志彬, 等. 不同绿肥覆盖对紫色土坡地柑橘园土壤侵蚀及有机碳流失的差异性影响 [J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 275−286.
Wang Z Y, Wang S, Zhang Z B, et al. Differential effects of different green manure cover crops on soil erosion and organic carbon loss in *Citrus* orchards on purple soil slopes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 275−286.

[16] Lozano-Parra J, Schnabel S, Pulido M, et al. Effects of soil moisture and vegetation cover on biomass growth in water-limited environments [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(11): 4405−4414.

[17] 黄曼贞, 唐益萍. 武鸣沃柑主要气象灾害及防御对策 [J]. 气象研究与应用, 2018, 39(2): 63−67.
Huang M Z, Tang Y P. Main meteorological disasters and countermeasures for Wuming wogan citrus [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2018, 39(2): 63−67.

[18] Francesca B , Patrizia F , Donatella P , et al. Determination of sugar content in commercial fruit juices by refractometric, volumetric and chromatographic methods [J]. Journal of Nutritional Therapeutics, 2016, 5(3): 75−84.

[19] Yan Y, Yang Y, Dai Q. Effects of preferential flow on soil nutrient transport in karst slopes after recultivation [J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(3): 034012.

[20] 魏彬萌, 王益权. 渭北果园土壤物理退化特征及其机理研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 694−701.
Wei B M, Wang Y Q. Physical degradation characteristics and mechanism of orchard soil in Weibei Region [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(3): 694−701.

[21] 李桂龙, 秦文婧, 陈晓芬, 等. 资源获取型和保守型根系性状的绿肥作物对红壤旱地土壤质量和细菌群落的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(3): 419−431.
Li G L, Qin W J, Chen X F, et al. The impacts of green manures with root traits of resource acquisitive and conservative strategies on soil quality and bacterial communities in ultisol [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(3): 419−431.

[22] Wang Y, Shi L, Hu X, et al. Multiphysics-informed neural networks for coupled soil hydrothermal modeling [J]. Water Resources Research, 2023, 59(1): e2022WR031960.

[23] Modiba M M, Ocansey C M, Ibrahim H T M, et al. Assessing the impact of tillage methods on soil moisture content and crop yield in hungary [J]. Agronomy, 2024, 14(8): 1606.

[24] 陈佩岩, 马岚, 梅雪梅, 等. 降雨过程中不同密度枯落物对各土层含水率动态影响 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(11): 93−101.
Chen P Y, Ma L, Mei X M, et al. Dynamic influence of different densities litter on moisture content in each soil layer during rainfall process [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(11): 93−101.

[25] 石然启, 王晗生, 邓文凯, 等. 南疆平原区枣园树形与生草对小气候的影响 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(4): 1127−1134.
Shi R Q, Wang H S, Deng W K, et al. Effects of different tree forms and grass mulching on microclimate in *Ziziphus jujuba* orchards in the plain regions of southern Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(4): 1127−1134.

[26] Hudek C, Putinica C, Otten W, et al. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties [J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(1): e13147.

[27] Capri C, Lozano-Parra J, Schnabel S, et al. A comparative study of fifteen cover crop species for orchard soil management: water uptake, root density traits and soil aggregate stability [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 1217.

[28] 张佳佳, 肖文发, 雷蕾, 等. 柑橘园覆盖光叶苕子促进土壤颗粒有机碳净积累 [J]. 林业科学, 2025, 61(2): 74−84.
Zhang J J, Xiao W F, Lei L, et al. Smooth-vetch cover promotes the net accumulation of soil particulate organic carbon of citrus orchards [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(2): 74−84.

[29] Yan F, Liu X, Zhang Y, et al. Cover crops alter soil physicochemical properties: a global meta-analysis [J]. Geoderma, 2024, 442: 116771.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　臧润国）