果 树 学 报 2025,42(12):2874-2884
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250085

行间生草对石榴园土壤生境与果实品质的影响

郑锦涛[1,2,3],徐国益[2,3],于会丽[2,3],董睿权[2,3],司 鹏[2,3*],余义和[1*]

([1]河南科技大学园艺与植物保护学院,河南洛阳 471000;[2]中国农业科学院郑州果树研究所,郑州 450009;
[3]中国农业科学院中原研究中心,河南新乡 453000)

摘 要:【目的】探究生草对云南省宾川县石榴园土壤生境与果实品质的影响,筛选出适宜当地栽培的草种。**【方法】**以华光软籽石榴为试材,清耕作为对照,设置黑麦草、箭筈豌豆、白三叶、毛叶苕子以及自然生草5种行间生草处理,测定根际土壤养分含量、酶活性、微生物数量与石榴果实品质指标。**【结果】**白三叶处理果园土壤pH显著低于其他处理,较清耕降低了11.62%,同时在提高土壤有机质、水解性氮、有效磷、速效钾、交换性钙含量和蔗糖酶活性以及细菌和放线菌数量方面优于其他处理,较清耕分别显著提高了38.02%、41.12%、42.51%、94.51%、39.84%、25.47%、60.19%和60.66%;黑麦草处理在提高土壤交换性镁含量和碱性磷酸酶活性方面表现最佳,较清耕分别显著提高了24.33%和21.20%;白三叶生草处理在提高果实单果质量、横径、可溶性固形物和可滴定酸含量方面效果最佳,分别较清耕显著提高了28.14%、16.11%、14.13%和32.72%。**【结论】**石榴园进行白三叶生草处理后土壤有机质、水解性氮、有效磷、速效钾、交换性钙含量和蔗糖酶活性以及细菌和放线菌数量最高,石榴果实单果质量、横径、可溶性固形物和可滴定酸含量分别达到425.34 g、100.90 mm、17.77%和0.72%,显著高于其他处理,是云南省宾川县地区石榴园进行生草栽培的适宜草种。

关键词:软籽石榴;生草栽培;果实品质;土壤微生物

中图分类号:S665.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2025)12-2874-11

Effects of orchard sod culture on soil environment and pomegranate fruit quality

ZHENG Jintao[1,2,3], XU Guoyi[2,3], YU Huili[2,3], DONG Ruiquan[2,3], SI Peng[2,3*], YU Yihe[1*]

([1]College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China; [2]Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450009, Henan, China; [3]Zhongyuan Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453000, Henan, China)

Abstract:【Objective】Grass cultivation is a contemporary and effective soil management strategy for orchards. Its success depends on the careful selection of suitable grass species and the implementation of scientifically sound management practices. By planting legumes or grasses between the rows of fruit trees and managing them appropriately, a harmonious coexistence between the grasses and fruit trees can be established. This approach enhances soil nutrient levels, which in turn positively impacts the growth of fruit trees and the quality of their produce. However, in the current pomegranate farming industry, the majority of farmers still rely on clear-cutting for orchard management. This practice degrades the soil environment, negatively affecting the growth and development of fruit trees and ultimately reducing fruit quality. In recent years, grass cultivation in orchards has gained increasing popularity both domestically and internationally. This technique serves as an effective orchard management model, reducing the impact of weeds while helping to maintain soil moisture. To identify grass species suitable for the local climate and cultivation conditions, this study investigated the effects of different grass spe-

收稿日期:2025-02-18 **接受日期:**2025-06-09

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1600800);河南省重点研发专项(221111111800);河南省重点研发与推广专项(222102110416)

作者简介:郑锦涛,男,在读硕士研究生,研究方向为农艺与种业。E-mail:17337156671@163.com

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:sipeng@caas.cn;E-mail:yuyihe2008@163.com

cies on soil properties and fruit quality in pomegranate orchards in Binchuan County, Yunnan Province.【Methods】This study implemented grass cultivation in soft-seeded pomegranate orchards to assess the impact of different green manure species on fruit quality, soil nutrient content, soil enzyme activity, and soil microbial abundance. The pomegranate variety used in the experiment was Huaguang. The experimental design included six treatments: VS (*Vicia sativa*), LP (*Lolium perenne*), TR (*Trifolium repens*), VV (*Vicia villosa*), NG (natural grasses), and CK (clear tillage) as the control. Each treatment was cultivated and managed over a two-year period. Soil samples from the pomegranate orchards were collected under each of the six treatments. The pH value, organic matter content, nutrient content, enzyme activity, and microbial counts were analyzed in the rhizosphere soil samples. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to examine differences in the rhizosphere soil environment among the six cultivation and management treatments. Uniformly sized pomegranate fruits were harvested two weeks prior to ripening. The weight, longitudinal and transverse diameters, fruit shape index, titratable acidity, soluble solids content, and solid-acid ratio of individual fruits were measured. One-way ANOVA was also employed to compare the external and internal quality of pomegranate fruits across the six cultivation and management treatments. The six cultivation and management modes were ranked based on evaluations of soil habitat and fruit quality, with the highest-ranked mode identified. Correlation analyses were conducted to explore the relationships between fruit quality and environmental factors, thereby revealing the underlying mechanisms through which the environmental factors influence fruit quality.【Results】Grass cover can improve the orchard environment, yet different grass species exhibit varying regulatory effects on it. Compared with CK, most grass treatments, except for NG, can enhance soil nutrient levels. Among them, the TR treatment showed the most significant improvement ($P<0.05$). The pH value of orchard soil was adjusted to neutral, reaching the soil pH value suitable for cultivating soft-seeded pomegranate. The soil organic matter content, hydrolyzable nitrogen content, effective phosphorus content, quick-acting potassium content, exchangeable calcium content, sucrase activity, bacterial counts, and actinomycete counts were significantly higher than those of CK. Specifically, these parameters increased by 38.02%, 41.12%, 42.51%, 94.51%, 39.84%, 25.47%, 60.19%, and 60.66%, respectively. The LP treatment performed best in increasing soil exchangeable magnesium content, and alkaline phosphatase activity by 24.33% and 21.20%, respectively, compared to CK. In comparison of CK, all grass treatments except for natural grassing altered both the intrinsic quality and external quality of the fruit. Moreover, cultivation of different grasses had different effects on fruit quality. Among them, the TR treatment exhibited the most significant improvements in fruit weight, soluble solids content, and titratable acidity, with respective increases of 28.14%, 14.13%, and 32.72%. Based on the comprehensive impact assessment results, the TR treatment ranked first in enhancing the orchard soil environment and fruit quality. Correlation analysis showed that soil pH was significantly and negatively correlated with soil nutrient content, soil enzyme activity, and soil microbial quantity, and fruit quality was significantly and positively correlated with soil microbial quantity. Cultivation of grass in orchards can change soil water holding capacity, adjust the soil pH, increase the retention capacity of soil, soil enzyme activity, and soil microbial quantity, ultimately improving fruit quality.【Conclusion】*Trifolium repens* living mulch in pomegranate orchards significantly elevated soil organic matter, hydrolytic N, available P, quick-acting K, exchangeable Ca, invertase activity, and counts of bacteria and actinomycetes compared with other treatments. Concomitantly, fruit quality peaked under *Trifolium repens*: average fruit mass reached 425.34 g, transervse diameter 100.90 mm, total soluble solids 17.77%, and titratable acidity 0.72%−all markedly higher than others. Living mulch enhanced soil nutrients, enzyme activity and mi-

crobial biomass, ameliorating the soil habitat and advancing fruit quality. Thus, white clover is the most suitable cover crop for pomegranate orchards in Binchuan County, Yunnan.

Key words: Soft-seeded pomegranate; Sod culture; Fruit quality; Soil microorganism

石榴（*Punica granatum* L.）是千屈菜科石榴属的植物，因其果实风味独特、营养含量高且具有较强的抗氧化作用，被誉为“超级水果”[1]。随着石榴商业化种植规模的持续扩张，石榴栽培逐渐走向区域化、规模化和标准化，传统的清耕模式通过机械或化学方式对果园行间、株间和树盘进行无草处理，虽可在短期内减少杂草对果树生长的影响，但长期土壤裸露加剧了区域季节性干旱，导致土壤水分散失[2]，造成土壤团粒结构被破坏、土壤肥力降低，严重制约果树生长发育及产业的可持续发展。研究表明，人工生草栽培模式通过构建草种与果树之间的共生系统，既能有效避免杂草的影响，又能改善果园微域环境和土壤理化性质，提高果树根系对养分的吸收利用能力，是推动果园高效、可持续发展的关键技术[3]。

果园生草草种的筛选需兼顾生态适应性、土壤培肥效应及种间互作关系[4]，其中豆科与禾本科草种因具备生物固氮能力和田间管理优势而被广泛应用[5]。此外，草种适配性受区域气候特征、土壤理化性质与果树生物学特性的协同调控，表现出显著的地域差异与树种特异性[6]。研究表明，黄土高原地区苹果园选用黑麦草、三叶草、光叶苕子和长柔毛野豌豆进行生草栽培效果最优[7]，而西藏林芝地区苹果园则适宜选择箭筈豌豆＋燕麦混播和紫花苜蓿单播[8]；新疆阿克苏苹果园适宜选择白三叶、百脉根和箭筈豌豆进行生草栽培[9]，而同区域灰枣园则适合选择油菜间作[10]。云南大理宾川县石榴种植区受干热河谷气候与坡地地形叠加影响，普遍存在土壤有机质含量不足、养分流失、果园生态环境脆弱等问题。果园生草是促进软籽石榴产业快速发展并解决土壤肥力退化问题的有效途径。现有研究已明确了苹果、柑橘等果树地域、树种与草种之间的适配规律，但针对软籽石榴果园的生草栽培机制的研究不够充分，尤其在云南省宾川县地区适宜种植的草种尚未明确。

笔者在本研究中以软籽石榴为研究对象，通过测量箭筈豌豆、黑麦草、白三叶、毛叶苕子和自然生草等栽培管理模式下石榴园根际土壤的理化性质、酶活性、微生物数量以及果实品质的差异，为挑选适宜在云南宾川地区石榴园进行生草栽培的草种提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于2022—2023年进行，试验地点为云南宾川软籽石榴种植基地（25° 55′ 57.464″ N，100° 35′ 25.152″ E），海拔1468 m，位于低纬度高原，属于中亚热带季风气候，冬干夏湿。年平均气温17.9 ℃，年均降雨量559.4 mm，主要集中在5—10月。

1.2 试验设计

试材为华光软籽石榴品种，株间距为1.5 m，行间距为2 m。试验田地分别设置清耕、自然生草、箭筈豌豆、黑麦草、白三叶和毛叶苕子6个处理，每组处理设置3次重复，采用随机区组设计，每个小区设置面积80 m^2。于2022—2023年生草栽培管理2 a（年），以清耕为对照。

1.3 样品采集

于2023年9月采集土壤样品，从各处理区域中间行随机选择5株长势一致的石榴树，在20 cm土层处采用抖根法取石榴根际土壤样品并去除杂质后分装为三部分，一部分进行风干处理用于土壤理化性质的测定，另外两部分低温保存用于土壤酶活性及微生物数量的测量。

于果实成熟前2周采集石榴样品，果实样品所选树体与采集土壤样品选择树体保持一致，从每株石榴果树东、南、西、北、中五个部位选取无病虫害、大小均匀的果实，采摘后低温保存用于测定果实外在品质和内在品质。

1.4 土壤养分含量分析测定方法

采用电位法确定土壤酸碱度，采用重铬酸钾容量法测定有机质含量，采用碱解蒸馏法分析水解性氮含量，采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法检测有效磷含量，采用中性乙酸铵溶液浸提-原子吸收光谱法测定速效钾含量，采用乙酸酰交换-EDTA络合滴定法测定土壤交换性钙、镁含量[11]。

1.5 土壤酶活性分析测定方法

土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶和蛋白酶活性分

别采用3,5-二硝基水杨酸比色法、苯酚钠-次氯酸钠比色法、磷酸苯二钠比色法和茚三酮比色法进行测定[12]。

1.6　土壤微生物数量测定方法

选择150 mL锥形瓶，加入90 mL无菌水，称取10 g土壤样品，室温振荡20 min，依次按照10^{-2}、10^{-3}、10^{-4}、10^{-5}的稀释比例处理，分别吸取0.1 mL不同梯度的菌悬液至牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、马丁氏培养基和高氏1号培养基中涂布均匀。在28 ℃环境中培养36 h，观察培养基上的细菌、真菌和放线菌菌落数[13]。

1.7　果实样品分析测定方法

每组重复随机选取5个果实，测量单果质量、果实纵横径和果皮厚度[14]，果形指数为纵径/横径比值。采用ATAGO（日本）公司生产的PAL系列检测设备对石榴籽粒品质进行测定。其中，通过PAL-1便携式数显折光仪对可溶性固形物含量进行检测，采用PAL-BXIACID1型酸度分析仪测定可滴定酸含量，固酸比为可溶性固形物含量/可滴定酸含量比值。

1.8　数据分析

数据经Excel 2016整理后，采用Origin 2024进行单因素方差分析与多重比较，综合评价通过主成分分析法实现，相关图形使用R语言绘制。

2　结果与分析

2.1　石榴园生草对根际土壤养分含量的影响

由表1可知，生草处理显著降低了土壤pH，降低幅度的顺序为白三叶＞黑麦草＞箭筈豌豆＞毛叶苕子＞自然生草，其中白三叶处理下土壤pH为7.15，呈中性，且显著低于其他处理（$P<0.05$），较清耕降低了11.62%。与清耕相比，白三叶、黑麦草、箭筈豌豆和毛叶苕子均能显著增加土壤有机质含量，其中白三叶处理土壤有机质含量（w，后同）为25.01 g·kg^{-1}，显著高于其他处理，较清耕增加了38.02%。白三叶处理下根际土壤氮磷钾钙养分富集显著增加，水解性氮、有效磷、速效钾和交换性钙含量分别为15.41、130.48、408.47 mg·kg^{-1}和28.22 cmol·kg^{-1}，较清耕分别增加了41.12%、42.51%、94.51%和39.84%。黑麦草处理下土壤中交换性镁含量显著提高，达14.77 cmol·kg^{-1}，较清耕增长了24.33%。综上所述，白三叶对石榴园土壤pH的调控以及水解性氮、有效磷、速效钾和交换性钙含量的提高效果更显著；黑麦草对石榴园土壤中交换性镁含量的提高效果更显著。

表1　不同生草处理对土壤养分含量影响

Table 1　Effects of different grassing treatments on soil pH and soil nutrient content

养分含量 Nutrient content	清耕 Clear ploughing	自然生草 Natural grass	箭筈豌豆 *Vicia sativa*	黑麦草 *Lolium perenne*	白三叶 *Trifolium repens*	毛叶苕子 *Vicia villosa*
pH	8.09±0.10 a	7.82±0.03 b	7.62±0.07 b	7.57±0.12 b	7.15±0.04 c	7.70±0.08 b
有机质 Organic matter/（g·kg^{-1}）	18.12±0.93 c	17.13±0.64 c	21.10±0.41 b	21.77±0.84 b	25.01±0.75 a	20.43±0.33 b
水解性氮 Hydrolyzable N/（mg·kg^{-1}）	10.92±0.37 d	12.70±0.16 c	13.04±0.12 c	14.94±0.09 ab	15.41±0.10 a	14.49±0.30 b
有效磷 Available P/（mg·kg^{-1}）	91.56±8.49 cd	76.13±7.53 d	93.5±2.60 cd	114.55±7.20 ab	130.48±5.20 a	102.45±4.08 bc
速效钾 Available K/（mg·kg^{-1}）	210.00±28.09 b	202.66±19.55 b	227.88±14.46 b	370.71±8.45 a	408.47±55.26 a	232.03±17.07 b
交换性钙 Exchangeable Ca/（cmol·kg^{-1}）	20.18±1.48 b	19.86±1.57 b	19.71±2.33 b	23.35±3.04 ab	28.22±1.47 a	21.81±1.27 b
交换性镁 Exchangeable Mg/（cmol·kg^{-1}）	11.88±1.20 bc	9.53±0.50 c	10.77±1.00 bc	14.77±0.86 a	13.07±0.41 ab	11.54±0.61 bc

注：表中数据为平均值±标准误。同行不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

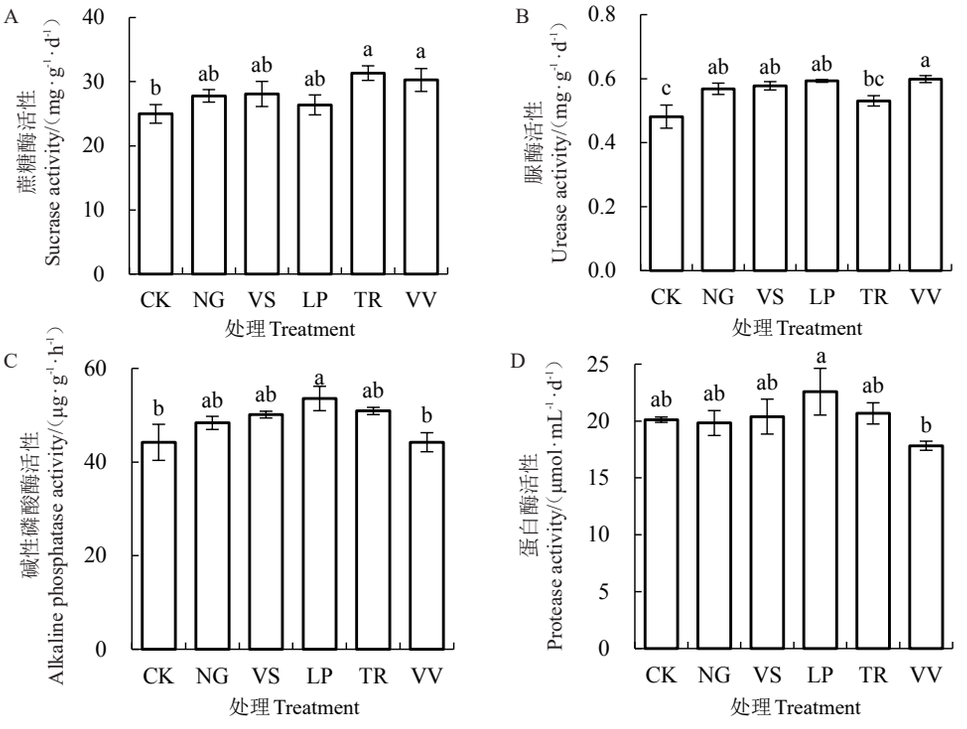
Note: Data are means ± standard error. Different small letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2　石榴果园生草对根际土壤酶活性的影响

不同生草处理对土壤酶活性的调控呈现差异性（图1）。白三叶显著提高土壤蔗糖酶活性至31.34 mg·g^{-1}·d^{-1}，较清耕增幅为25.47%。与清耕相比，除白三叶外，其他处理中脲酶活性显著提高（$P>0.05$），其中，毛叶苕子处理下土壤脲酶活性最高，为0.60 mg·g^{-1}·d^{-1}，较清耕增幅为24.38%。黑麦草处理土壤碱性磷酸酶活性显著提高，为53.58 μg·g^{-1}·h^{-1}，较清耕增幅为21.20%。黑麦草处理下蛋白酶活性显著高于毛叶苕子。由此可知，石榴园种植白三叶对土壤蔗糖酶活性提高效果最佳；种植毛叶苕子对土壤脲酶活性提高效果最佳；种植黑麦草对土壤碱性磷酸酶活性提高效果最佳。

2.3　石榴园生草对根际土壤微生物数量的影响

不同生草措施下土壤微生物数量如图2所示，其中白三叶处理根际土壤细菌和放线菌数量分别为55.00×10^6 CFU·g^{-1}和65.33×10^4 CFU·g^{-1}，均高于其他



CK. 清耕；NG. 自然生草；VS. 箭筈豌豆；LP. 黑麦草；TR. 白三叶；VV. 毛叶苕子。下同。

CK. Clear ploughing; NG. Natural grass; VS. *Vicia sativa*; LP. *Lolium perenne*; TR. *Trifolium repens*; VV. *Vicia villosa*. The same below.

图 1 不同生草处理对土壤酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different grassing treatments on soil enzyme activities

处理，相比清耕分别增加了60.19%和60.66%；黑麦草处理的细菌和放线菌数量次之，分别为53.33×10^6 CFU·g^{-1}和63.67×10^4 CFU·g^{-1}，较清耕分别增加了55.33%和56.56%。各处理间土壤真菌数量无显著差异。

2.4 石榴园生草对果实外在品质的影响

不同生草处理对石榴果实形态建成具有显著调控效应（图3）。白三叶处理石榴果实单果质量和果实横径分别为425.34 g和100.90 mm，显著高于其他处理，较清耕分别增加了28.14%和16.11%；自然生草处理果实纵径显著低于其他处理，较清耕降低了11.80%。由图3-D知，自然生草、黑麦草、白三叶和毛叶苕子处理下果形指数分别为0.84、0.84、0.86、0.86，果实形状接近扁圆形，清耕、箭筈豌豆处理果形指数分别为0.93和0.95，果实形状接近圆形。黑麦草和白三叶处理果皮厚度显著高于清耕，分别为3.89 和 3.47 mm，增加幅度分别为39.76%和24.67%。因此，石榴园种植白三叶对石榴单果质量

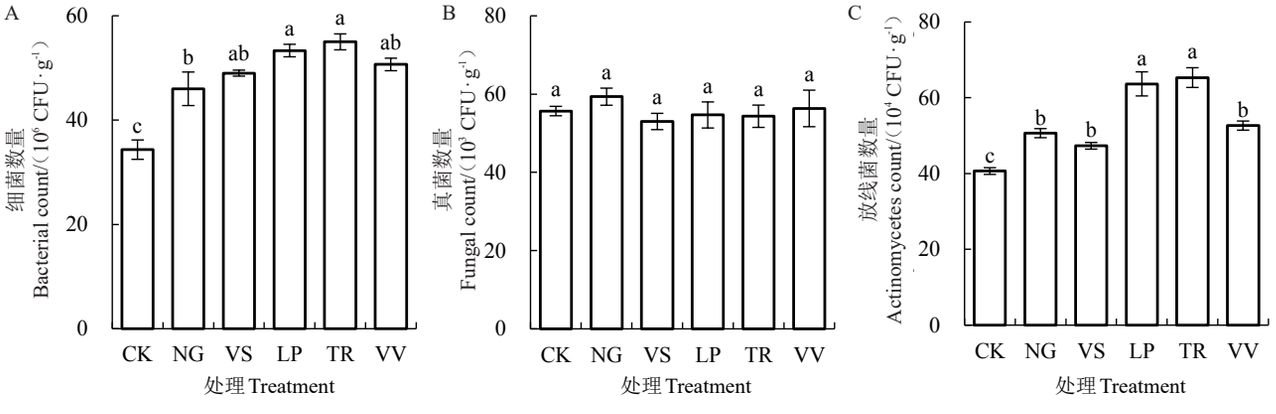


图 2 不同生草处理对根际土壤微生物数量的影响

Fig. 2 Effects of different grassing treatments on rhizosphere soil microbial quantity

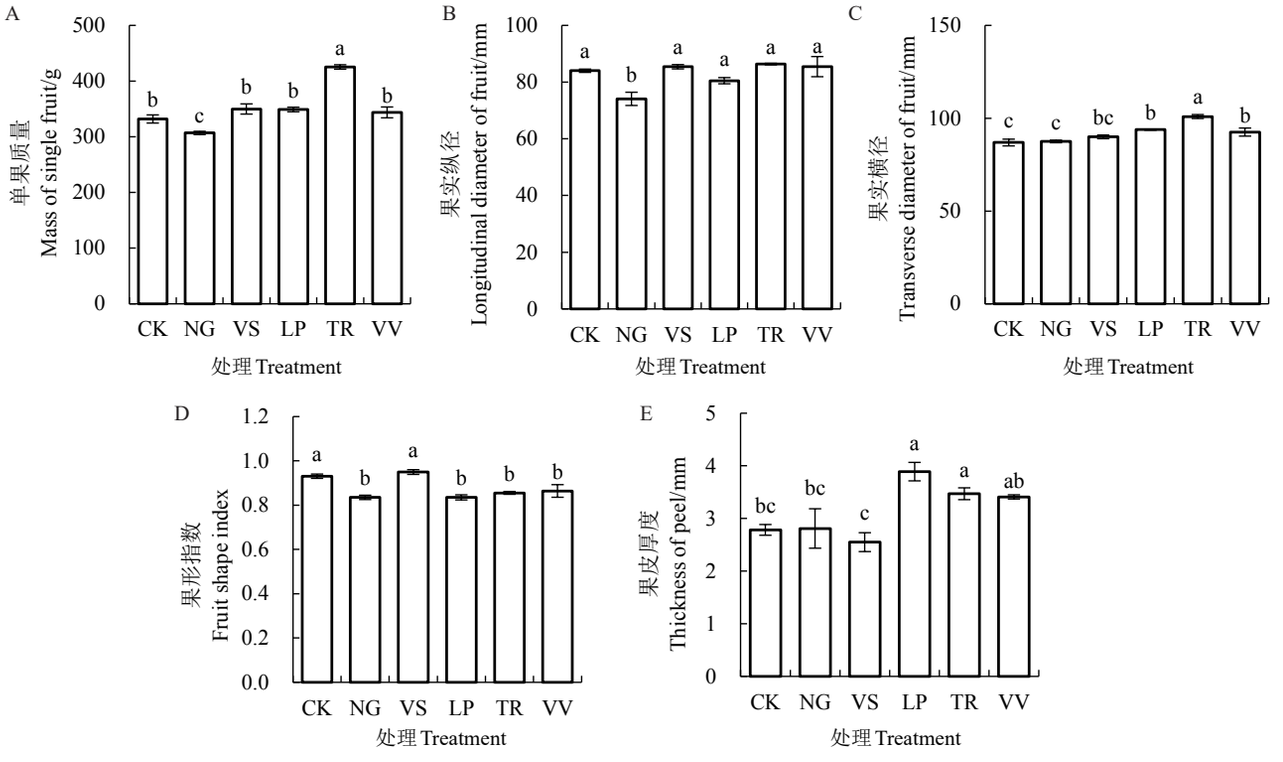


图 3　不同生草处理对石榴果实外在品质的影响

Fig. 3　Effects of different grassing treatments on the external quality of pomegranate fruit

和果实横径增加效果最显著；种植黑麦草石榴的果皮厚度和果形指数变化最显著。

2.5　生草对石榴果实内在品质的影响

白三叶、箭筈豌豆和黑麦草处理石榴果实可溶性固形物含量显著高于清耕（图 4-A），提高幅度分别为 14.13%、8.35%和 6.00%，其中白三叶生草处理果实可溶性固形物含量显著高于其他处理，达到 17.77%。白三叶处理石榴果实可滴定酸含量为 0.72%，显著高于其他生草处理（图 4-B），较清耕提高幅度为 32.72%。黑麦草生草处理下固酸比为 36.94，显著高于其他生草处理（图 4-C），较清耕提高幅度为 28.14%。由此可知，石榴园种植白三叶对果实可溶性固形物含量和可滴定酸含量的提高效果优于其他处理，种植黑麦草能显著提高果实固酸比，改善果实风味。

2.6　不同生草处理的石榴园土壤生境的综合评价

对软籽石榴果园土壤生境进行主成分分析，如表 2。提取了 3 个主成分，第一个主成分为 61.78%，第二个主成分为 16.81%，第三个主成分为 11.09%。以上 3 个主成分的累计贡献率为 89.68%。根据综合排序得分可知，生草处理的综合评分均高于清耕，其中白三叶处理对土壤生境影响最显著。

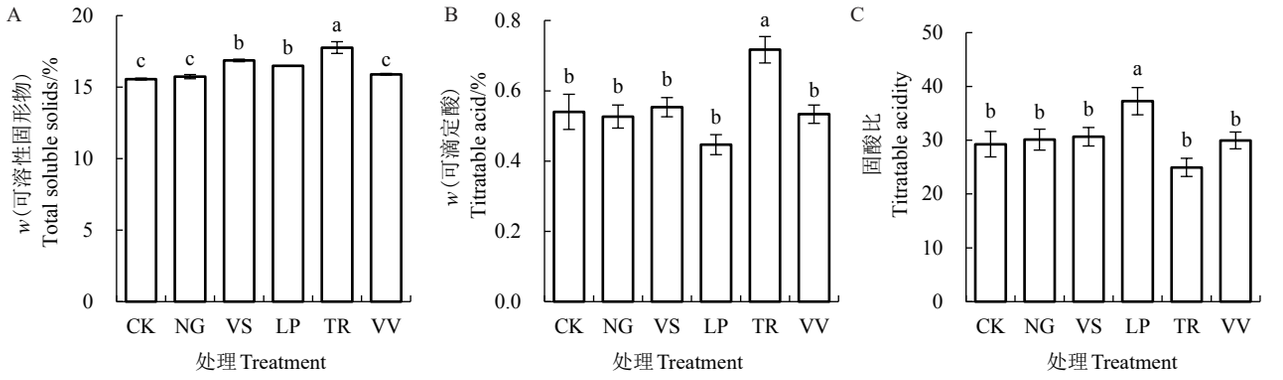


图 4　不同生草处理对石榴果实内在品质的影响

Fig. 4　Effects of different grassing treatments on the intrinsic quality of pomegranate fruit

表 2 不同生草处理对石榴园土壤生境综合影响评价

Table 2 Comprehensive evaluation of effects of different grassing treatments on soil habitats in pomegranate orchards

处理 Treatment	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
清耕 Clear ploughing	−2.07	0.57	−2.22	−1.59	6
自然生草 Natural grass	−0.51	0.69	−0.32	−0.27	4
箭筈豌豆 *Vicia sativa*	−0.64	−1.02	0.56	−0.56	5
黑麦草 *Lolium perenne*	1.15	−0.42	0.81	0.81	2
白三叶 *Trifolium repens*	1.56	0.31	0.90	1.24	1
毛叶苕子 *Vicia villosa*	0.52	−0.13	0.27	0.37	3

2.7 不同生草处理的石榴果实品质的综合评价

对石榴果实品质的主成分分析如表3。提取出2个主成分，第一个主成分为56.63%，第二个主成分为28.63%。以上2个主成分的累计贡献率为85.26%。根据综合排序得分可知，除自然生草外，生草处理的综合评分均高于清耕，其中白三叶处理提高果实品质的效果最优。

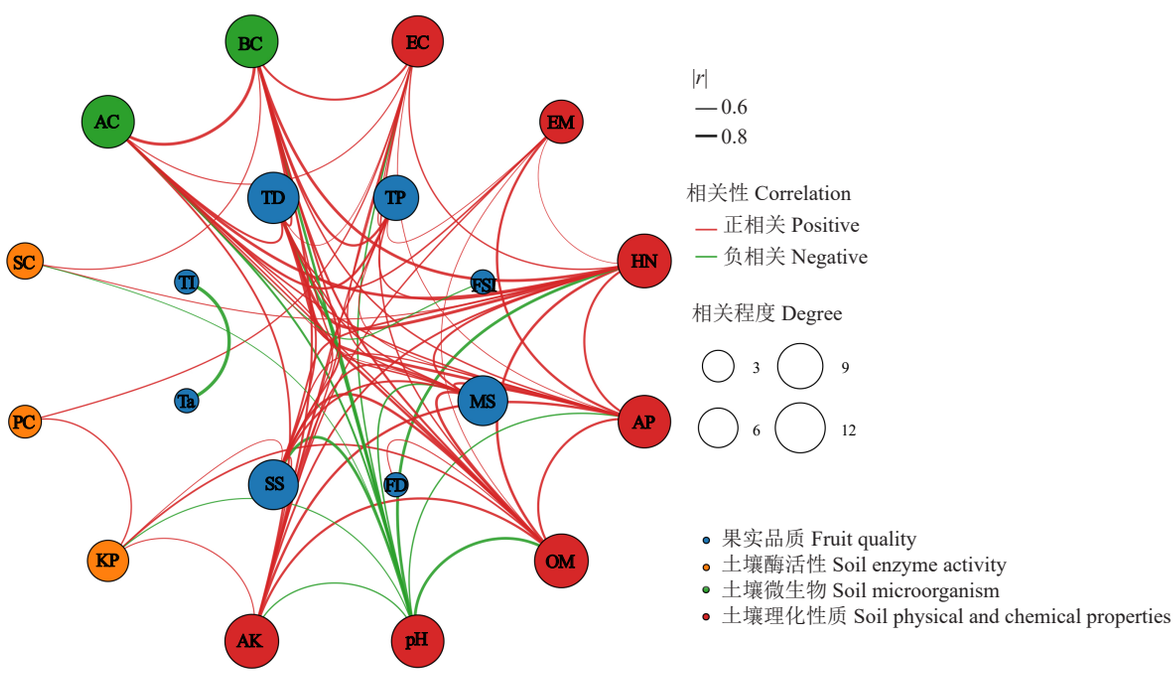
表 3 不同生草处理对石榴果实品质综合影响评价

Table 3 Comprehensive evaluation of effects of different grassing treatments on pomegranate fruit quality

处理 Treatment	主成分1 PC1	主成分2 PC2	综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
清耕 Clear ploughing	−0.33	−0.75	−0.47	5
自然生草 Natural grass	−2.38	−0.62	−1.79	6
箭筈豌豆 *Vicia sativa*	0.22	0.13	0.19	3
黑麦草 *Lolium perenne*	−0.25	1.20	0.24	2
白三叶 *Trifolium repens*	2.45	0.30	1.7	1
毛叶苕子 *Vicia villosa*	0.29	−0.26	0.11	4

2.8 石榴园果实品质与土壤生境之间的相关性分析

对本研究涉及的果实品质与土壤生境指标进行相关性分析，分析各指标之间的相关性（图5）。单果质量与土壤有机质、水解性氮、速效钾含量及



MS. 单果质量；FD. 果实纵径；TD. 果实横径；FSI. 果形指数；TP. 果皮厚度；SS. 可溶性固形物含量；TI. 可滴定酸含量；Ta. 固酸比；pH. 土壤酸碱度；OM. 有机质含量；HN. 水解性氮含量；AP. 有效磷含量；AK. 速效钾含量；EC. 交换性钙含量；EM. 交换性镁含量；SC. 蔗糖酶活性；PC. 蛋白酶活性；KP. 碱性磷酸酶活性；BC. 细菌数量；AC. 放线菌数量。下同。

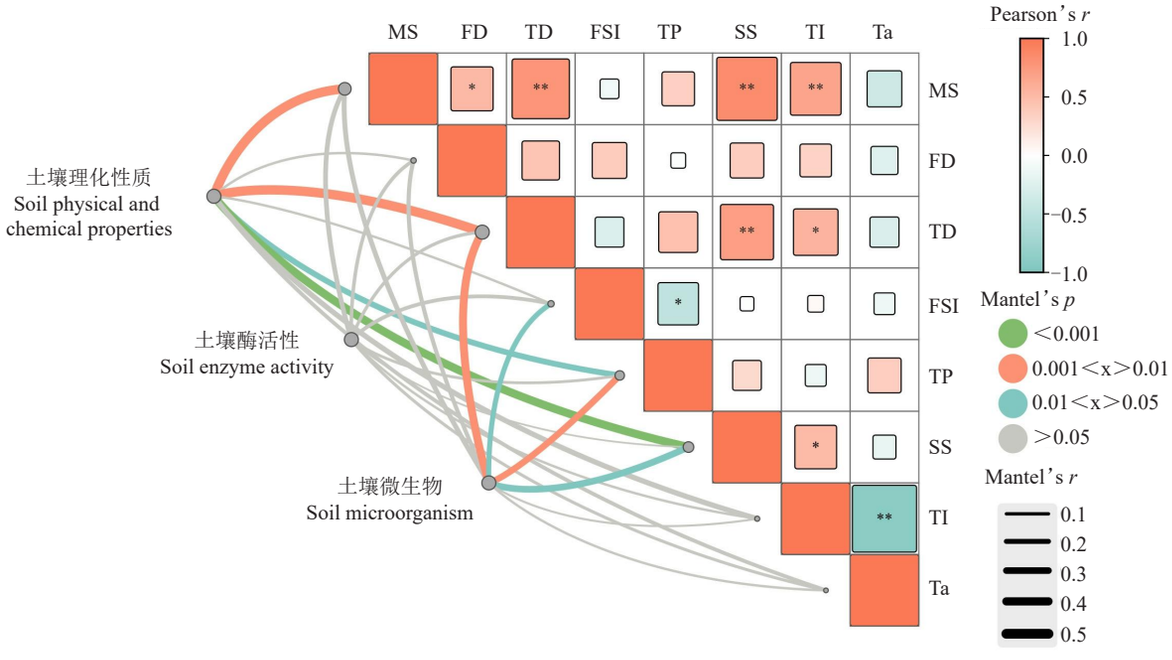
MS. Mass of single fruit; FD. Longitudinal diameter of fruit; TD. Transverse diameter of fruit; FSI. Fruit shape index; TP. Thickness of peel; SS. Soluble solids content; TI. Titratable acids content; Ta. Solid-acid ratio; pH. soil pH; OM. Organic matter content; HN. Hydrolyzable N content; AP. Available P content; AK. Available K content; EC. Exchangeable Ca content; EM. Exchangeable Mg content; SC. Sucrase activity; PC. Protease activity; KP. Alkaline phosphatase activity; BC. Bacterial count; AC. Actinomycetes count. The same below.

图 5 果实品质与环境因子相关性分析

Fig. 5 Analysis of the correlation between the quality of fruit and environmental factors

果实横径和果实可溶性固形物含量呈显著正相关（$P<0.05$），与土壤 pH 值呈显著负相关（$P<0.05$）；果皮厚度与土壤水解性氮、有效磷、速效钾、交换性钙含量及细菌和放线菌数量显著正相关；可溶性固形物含量与果实横径，土壤有机质、水解性氮、有效磷、速效钾含量，碱性磷酸酶活性，细菌和放线菌数量呈显著正相关；土壤 pH 值与果实单果质量，土壤速效钾、有效磷、交换性钙含量，蔗糖酶和碱性磷酸酶活性，细菌和放线菌数量呈显著负相关；有机质含量与果实纵径，土壤水解性氮、速效钾、有效磷、交换性钙、交换性镁含量，碱性磷酸酶活性，细菌和放线菌数量呈显著正相关；水解性氮含量与有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁含量，蔗糖酶、脲酶活性，细菌数量呈显著正相关；速效钾含量与碱性磷酸酶活性呈显著正相关；交换性钙含量与蔗糖酶、蛋白酶活性呈显著正相关。

土壤养分含量和土壤微生物数量与果实品质呈现显著的相关性（图 6），且与果实单果质量、横径和可溶性固形物含量的相关性最高。土壤理化性质与单果质量（$P<0.05$，$r=0.47$）、果实横径（$P<0.05$，$r=0.47$）和果实可溶性固形物含量（$P<0.01$，$r=0.39$）呈现高度相关，但与果皮厚度（$P<0.05$，$r=0.25$）的相关性较弱；土壤微生物数量与果实横径（$P<0.05$，$r=0.38$）和可溶性固形物含量（$P<0.05$，$r=0.30$）呈现高度相关，但与果形指数（$P<0.05$，$r=0.29$）相关性较弱。上述结果表明，土壤 pH 与养分（水解性氮、有效磷和速效钾）含量、微生物（细菌和放线菌）数量及酶（蔗糖酶和碱性磷酸酶）活性呈显著负相关；有机质含量与养分含量、碱性磷酸酶活性和微生物（细菌和放线菌）数量呈显著正相关；果实横径与可溶性固形物、土壤养分含量和微生物数量呈现显著相关性。



*和**分别表明显著水平在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$。

* and ** indicate the significance level at $P < 0.05$ and $P < 0.01$.

图 6　果实品质与环境因子 Mantel 分析

Fig. 6　Mantel analysis of fruit quality and environmental factors

3　讨　论

3.1　生草处理对石榴园土壤生境的影响

土壤 pH 超出适宜范围会显著阻碍果树的生长和发育[15]，软籽石榴的适宜生长范围为 6.7~7.5 的中性或偏碱性土壤[16]。本研究发现生草措施显著改善了软籽石榴根际土壤环境，生草处理显著降低了土壤 pH，其中白三叶处理下土壤 pH 降至 7.1，其调控效果优于其他草种，达到适宜软籽石榴生长的土壤 pH 区间。该研究结果与刘华荣等[17]的研究结果一致。这一现象的原因可能是生草栽培过程中，绿肥枯落物分解产生的 CO_2 和有机酸[18]，同时，白三叶具

有较强的固氮特性，其根系分泌的有机酸能够螯合钙离子，加速土壤碳酸盐体系解离[19]，进一步造成土壤pH下降。随着土壤pH的降低，土壤中铁和铝氧化物表面的正电荷增加，有利于土壤有机质的吸附[20]。本试验中，箭筈豌豆、黑麦草、白三叶、毛叶苕子处理显著提高了石榴园土壤有机质含量，这与柑橘园[21]和苹果园[22]的研究结果一致。此外，黑麦草和白三叶处理均提高了根际土壤中N、P、K、Ca、Mg含量，箭筈豌豆和毛叶苕子处理对根际土壤中N、P、K也存在不同程度的提升，说明生草栽培能提高果树根际对养分的吸附，与史进等[23]和潘介春等[24]的研究结果一致，其主要原因可能是生草栽培对土壤结构产生了积极影响，优化了土壤孔隙结构和保水能力，其根系分泌物和地上部残体分解，释放了大量有机物质，进一步促进养分循环和释放[25]。

根际微生物中包含有益微生物，可促进果树生长并提高耐受性[26]，而根际微生物的结构和功能受到土壤养分组成和有效性的控制[27]。生草栽培有助于调节土壤养分比例，并为微生物提供丰富的营养基础[28]。本研究结果表明，果园生草能显著提高根际土壤细菌与放线菌数量，且白三叶的提升效果最显著，与赵海州等[29]和龙妍等[30]的研究结果一致，说明生草栽培通过调控土壤pH与养分结构塑造根际微生物的生存环境，进而调控微生物数量。相关性分析表明根际土壤中细菌和放线菌数量与土壤pH呈显著负相关，与土壤养分含量呈显著正相关。进一步阐明了生草栽培中土壤环境与微生物之间的互作机制：一方面，生草栽培通过草种根系结构与分泌物改善土壤pH和养分含量，从而促进有益菌活性；另一方面，土壤微生物分解有机质的过程中，释放出大量的矿质养分[31]，如氮、磷、钾等，提高了土壤养分的供应能力，进而促进果树对养分的吸收。

3.2 生草处理对石榴果实品质的影响

果实品质的形成取决于土壤养分的综合调控作用[32]。本试验发现，白三叶处理显著提高了果实单果质量及果实横径，改变了果实形状，同时，白三叶、黑麦草、箭筈豌豆处理显著提高了石榴果实的可溶性固形物含量；白三叶处理显著提高了石榴果实可滴定酸含量；黑麦草处理显著提高了石榴果实固酸比。与潘莹安等[33]和李国鹏等[34]的研究结果一致。说明生草栽培能改善果实品质。Mantel分析表明，果实品质与土壤养分含量及微生物数量呈显著正相关，且与果实单果质量、果实横径和果实可溶性固形物含量的相关性最高。这进一步说明了果园生草模式改善果实品质的途径：生草栽培促进凋落物分解与根系分泌物释放，进而促进根际土壤中速效养分的富集；同时土壤微生物的增殖加速有机质矿化，提升养分有效性，刺激植物根系的生长[35]，从而提高果树吸收水分和养分的能力；最终通过促进果实细胞膨大（如单果质量和果实横径[36]增加）及光合作用（如可溶性固形物积累[37]）实现对果实品质的提升。

4 结 论

本研究通过测定不同生草模式下石榴园土壤理化性质、微生物数量、土壤酶活性以及果实外在和内在品质并进行差异性和相关性分析，发现白三叶处理下石榴园土壤有机质、水解性氮、有效磷、速效钾、交换性钙含量，蔗糖酶活性，细菌和放线菌数量及石榴果实单果质量、横径、可溶性固形物和可滴定酸含量高于其他处理，对改善果园土壤生境以及提高果实品质效果最好，可为干热河谷坡地果园管理提供参考。

参考文献 References：

[1] YUAN Z H，FANG Y M，ZHANG T K，FEI Z J，HAN F M，LIU C Y，LIU M，XIAO W，ZHANG W J，WU S，ZHANG M W，JU Y H，XU H L，DAI H，LIU Y J，CHEN Y H，WANG L L，ZHOU J Q，GUAN D，YAN M，XIA Y H，HUANG X B，LIU D Y，WEI H M，ZHENG H K. The pomegranate (*Punica granatum* L.) genome provides insights into fruit quality and ovule developmental biology[J]. Plant Biotechnology Journal，2018，16(7)：1363-1374.

[2] 陈利娜，敬丹，唐丽颖，曹尚银 . 新中国果树科学研究 70 年：石榴[J]. 果树学报，2019，36(10)：1389-1398.
CHEN Lina，JING Dan，TANG Liying，CAO Shangyin. Fruit scientific research in New China in the past 70 years：Pomegranate[J]. Journal of Fruit Science，2019，36(10)：1389-1398.

[3] 位杰，蒋媛，王丙太，徐其涛，王晓豫 . 果园生草栽培与利用技术[J]. 北方园艺，2018(6)：197-201.
WEI Jie，JIANG Yuan，WANG Bingtai，XU Qitao，WANG Xiaoyu. Technique of cultivation and application on pasture-planting in fruit orchard[J]. Northern Horticulture，2018(6)：197-201.

[4] 刘传和，陈杰忠 . 我国果园生草栽培研究概况[J]. 亚热带植物科学，2005，34(2)：76-80.
LIU Chuanhe，CHEN Jiezhong. A review of study on sod cultivation in fruit orchard[J]. Subtropical Plant Science，2005，34(2)：76-80.

[5] GRANATSTEIN D，SÁNCHEZ E. Research knowledge and needs for orchard floor management in organic tree fruit systems[J]. International Journal of Fruit Science，2009，9(3)：257-281.

[6] 寇建村，杨文权，韩明玉，陈奥，李冰，张维 . 我国果园生草研究进展[J]. 草业科学，2010，27(7)：154-159.
KOU Jiancun，YANG Wenquan，HAN Mingyu，CHEN Ao，LI Bing，ZHANG Wei. Research progress on interplanting grass in orchard in China[J]. Pratacultural Science，2010，27(7)：154-159.

[7] 成永娟 . 黄土高原苹果园生草对土壤、叶片和果实品质的影响[D]. 兰州：甘肃农业大学，2024.
CHENG Yongjuan. Effects of grass growth on soil，leaf and fruit quality in apple orchards on the Loess Plateau [D]. Lanzhou：Gansu Agricultural University，2024.

[8] 王宇桃 . 生草模式对西藏林芝苹果园土壤呼吸和果实品质的影响[D]. 林芝：西藏农牧学院，2023.
WANG Yutao. Effects of grass growth patterns on soil respiration and fruit quality of apple orchards in Nyingchi，Xizang Autonomous Region[D]. Linzhi：Tibet Agricultural and Animal Husbandry University，2023.

[9] 封帆 . 林下生草对苹果园小环境和昆虫群落及果实品质的影响[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2022.
FENG Fan. Effects of inter cropping grass on micro environment，insect community and fruit quality in apple orchard[D]. Urumqi：Xinjiang Agricultural University，2022.

[10] 木合塔尔•扎热，故丽米热•卡克什，艾海提•克然木，吴正保，马合木提•阿不来提 . 绿肥间作对灰枣果园土壤肥力和果实品质的影响[J]. 中国土壤与肥料，2024(7)：135-142.
MUHTAR·Zari，GULMIRA·Kakix，AHAT·Keram，WU Zhengbao，MAHMUT · Ablat. Effects of green manure intercropping on soil fertility and fruit quality in “Huizao” Jujube orchard[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2024(7)：135-142.

[11] 鲍士旦 . 土壤农化分析[M]. 3 版 . 北京：中国农业出版社，2000.
BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing：China Agriculture Press，2000.

[12] 关松荫 . 土壤酶及其研究法[M]. 北京：农业出版社，1986.
GUAN Songyin. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing：Agriculture Press，1986.

[13] 孙丽丽，黎婉玲，张纯，顾文杰，李雅莹，卢钰升，姜礼尧，王丹 . 甲咪唑烟酸对水稻田土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 广东农业科学，2022，49(10)：87-95.
SUN Lili，LI Wanling，ZHANG Chun，GU Wenjie，LI Yaying，LU Yusheng，JIANG Liyao，WANG Dan. Effects of imazapic on soil microbial communities and soil enzyme activities in paddy fields[J]. Guangdong Agricultural Sciences，2022，49(10)：87-95.

[14] 王璐伟，陈利娜，李好先，刘锐涛，李松开，杨庆华，杨雪花，严琼，鲁振华 . 不同类型果袋对天使红石榴果实品质的影响[J]. 果树学报，2024，41(1)：113-121.
WANG Luwei，CHEN Lina，LI Haoxian，LIU Ruitao，LI Songkai，YANG Qinghua，YANG Xuehua，YAN Qiong，LU Zhenhua. Effects of different types of fruit bags on fruit quality in Tianshihong pomegranate[J]. Journal of Fruit Science，2024，41(1)：113-121.

[15] 付小猛，杨虹霞，龙春瑞，刘红明，杜玉霞，周先艳，毛加梅，郭莉娜，岳建强 . 土壤 pH 对果园土壤质量的影响及调控技术研究综述[J]. 辽宁农业科学，2023(4)：75-78.
FU Xiaomeng，YANG Hongxia，LONG Chunrui，LIU Hongming，DU Yuxia，ZHOU Xianyan，MAO Jiamei，GUO Lina，YUE Jianqiang. Review on effects of soil pH on soil microecology and regulation techniques in orchards[J]. Liaoning Agricultural Sciences，2023(4)：75-78.

[16] 张欢，高小峰，雷梦瑶，陶爱丽，李玉英，姚岗 . 软籽石榴果园土壤养分与果实品质关系的多元分析及其优化方案[J]. 河南农业科学，2022，51(4)：111-119.
ZHANG Huan，GAO Xiaofeng，LEI Mengyao，TAO Aili，LI Yuying，YAO Gang. Multivariate analysis of the relationship between soil nutrients and fruit quality and optimization of soil nutrients in soft-seed pomegranate orchards[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences，2022，51(4)：111-119.

[17] 刘华荣，蒙正兵，张瑜 . 苹果园行间生草模式综合效应初探[J]. 贵州畜牧兽医，2016，40(6)：50-54.
LIU Huarong，MENG Zhengbing，ZHANG Yu. Study on the synthetical effects of different intercropping model in apple orchard[J]. Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine，2016，40(6)：50-54.

[18] 杨奉霞 . 中国南方梨园生草效应研究[D]. 杭州：浙江大学，2015.
YANG Fengxia. A study on the effect of sod culture in pear orchards in southern China[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2015.

[19] 顾炽明，李越，李银水，谢立华，沈欣杰，李小勇，秦璐，廖星 . 绿肥腐解液中有机酸组成对铝磷和铁磷活化能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2021，27(9)：1627-1635.
GU Chiming，LI Yue，LI Yinshui，XIE Lihua，SHEN Xinjie，LI Xiaoyong，QIN Lu，LIAO Xing. Effects of organic acid composition in the decomposed liquid of green manure crops on the activation level of $AlPO_4$ and $FePO_4 \cdot 2H_2O$[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2021，27(9)：1627-1635.

[20] WANG C Q，KUZYAKOV Y. Soil organic matter priming：The pH effects[J]. Global Change Biology，2024，30(6)：e17349.

[21] TU A G，XIE S H，ZHENG H J，LI H R，LI Y，MO M H. Long-term effects of living grass mulching on soil and water conservation and fruit yield of citrus orchard in South China[J]. Agricultural Water Management，2021，252：106897.

[22] 张朋朋 . 生草对山地苹果园土壤质量提升及树体发育效应研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2024.
ZHANG Pengpeng. Effect of grass on soil quality improvement and tree development in mountain apple orchards[D]. Yangling：

Northwest A & F University，2024.

[23] 史进，李文胜，张俊苗 . 生草栽培对果园生态环境和果实品质的影响[J]. 新疆农业科学，2016，53(4)：647-654.
SHI Jin，LI Wensheng，ZHANG Junmiao. Influence of sod culture on the ecology environment and fruit quality in orchards[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，2016，53(4)：647-654.

[24] 潘介春，徐石兰，丁峰，张振镜，周煜棉，王金英，徐炯志，邓英毅，程夕冉，莫云川 . 生草栽培对龙眼果园土壤理化性质和微生物学性状的影响[J]. 中国果树，2019(6)：59-64.
PAN Jiechun，XU Shilan，DING Feng，ZHANG Zhenjing，ZHOU Yumian，WANG Jinying，XU Jiongzhi，DENG Yingyi，CHENG Xiran，MO Yunchuan. Study on the effects of cover crops on the physic and chemical properties and the organism of soils in Longan orchards[J]. China Fruits，2019(6)：59-64.

[25] WOLF B，SNYDER G H. Sustainable soils：The place of organic matter in sustaining soils and their productivity[M]. Boca Raton：CRC Press，2003.

[26] LIMA H S，MANCINE N，PERUCHI G B，FRANCISCO C S，WANG N，DE SOUZA R S C，ARMANHI J S L，DELLA COLETTA-FILHO H. Microbial community of cultivated and uncultivated citrus rhizosphere microbiota in Brazil[J]. Scientific Data，2024，11：1294.

[27] XU H R，LIU W D，HE Y H，ZOU D，ZHOU J H，ZHANG J Y，BAI Y. Plant-root microbiota interactions in nutrient utilization[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering，2025，12(1)：16-26.

[28] 范玉贞 . 梨园间种白三叶草对土壤养分与微生物的影响[J]. 北方园艺，2010(6)：72-73.
FAN Yuzhen. The influence of interplanting white clover in the liyuan on soil nutrient and microorganism’s[J]. Northern Horticulture，2010(6)：72-73.

[29] 赵海洲，王如刚，李克磊，马璟，任淑娟，徐臣善 . 丘陵地苹果园生草对根际土壤理化性状及微生物的影响[J]. 北方园艺，2024(6)：79-85.
ZHAO Haizhou，WANG Rugang，LI Kelei，MA Jing，REN Shujuan，XU Chenshan. Effects of growing herbage on soil physical and chemical characteristics and microbes in hilly apple orchard[J]. Northern Horticulture，2024(6)：79-85.

[30] 龙妍，惠竹梅，程建梅，庞学良 . 生草葡萄园土壤微生物分布及土壤酶活性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2007，35(6)：99-103.
LONG Yan，XI Zhumei，CHENG Jianmei，PANG Xueliang. Ecological distributing of soil microorganisms and activity of soil enzymes in vineyard green covering[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)，2007，35(6)：99-103.

[31] LUO C H，HE Y J，CHEN Y P. Rhizosphere microbiome regulation：Unlocking the potential for plant growth[J]. Current Research in Microbial Sciences，2025，8：100322.

[32] 高柱，陈璐，张小丽，毛积鹏，樊志鹏，卢玉鹏，王小玲 . ‘红阳’猕猴桃果园土壤养分与果实品质关系的多元分析及优化方案[J]. 江西农业大学学报，2022，44(2)：358-367.
GAO Zhu，CHEN Lu，ZHANG Xiaoli，MAO Jipeng，FAN Zhipeng，LU Yupeng，WANG Xiaoling. Multivariate analysis and optimization of relationship between soil nutrients and fruit quality in Hongyang kiwifruit orchard[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis，2022，44(2)：358-367.

[33] 潘莹安，宋放，王策，周代年，范书云，蒋迎春，吴黎明，潘志勇 . 生草栽培和清耕栽培对桃叶橙根际土壤、微生物群落和果实品质的影响[J]. 湖北农业科学，2024，63(12)：125-128.
PAN Ying’an，SONG Fang，WANG Ce，ZHOU Dainian，FAN Shuyun，JIANG Yingchun，WU Liming，PAN Zhiyong. The effects of grass cultivation and clearing cultivation on the rhizosphere soil，microbial community，and fruit quality of Taoye Cheng[J]. Hubei Agricultural Sciences，2024，63(12)：125-128.

[34] 李国鹏，林景新，吴铭涎，李甜子，乔健 . 果园生草对番石榴果实品质的影响[J]. 中国南方果树，2023，52(3)：41-45.
LI Guopeng，LIN Jingxin，WU Mingxian，LI Tianzi，QIAO Jian. Effect of grass cover in orchard on fruit quality of guava[J]. South China Fruits，2023，52(3)：41-45.

[35] MAITY A，MARATHE R A，SARKAR A，BASAK B B. Phosphorus and potassium supplementing bio-mineral fertilizer augments soil fertility and improves fruit yield and quality of pomegranate[J]. Scientia Horticulturae，2022，303：111234.

[36] 田野，姜文婷，陈国梁，张向前，王秀康，刘哲 . 枯草芽孢杆菌对枸杞品质成分和土壤特性的影响[J]. 北方园艺，2024(24)：75-83.
TIAN Ye，JIANG Wenting，CHEN Guoliang，ZHANG Xiangqian，WANG Xiukang，LIU Zhe. Effects of *Bacillus subtilis* on quality components of *Lycium barbarum* and soil characteristics[J]. Northern Horticulture，2024(24)：75-83.

[37] 孔婷婷，刘爱华，张静文，岳朝阳，努尔古丽，牛俊丽，杨健 . 石榴园土壤养分与果实品质的多元分析[J]. 河南农业大学学报，2017，51(3)：318-323.
KONG Tingting，LIU Aihua，ZHANG Jingwen，YUE Zhaoyang，Nuerguli，NIU Junli，YANG Jian. Multivariate analysis between boil nutrients and fruit qualities in pomegranate orchard[J]. Journal of Henan Agricultural University，2017，51(3)：318-323.