**DOI：10.11766/trxb202509110448** **CSTR：32215.14.trxb202509110448**

王菊，于锦涛，李明军，杨培志，翟丙年，李紫燕. 豆科绿肥对苹果园土壤生态系统多功能性的影响及驱动机制[J]. 土壤学报，2026，63（6）：2041–2052.

WANG Ju，YU Jintao，LI Mingjun，YANG Peizhi，ZHAI Bingnian，LI Ziyan. Effects and Driving Mechanisms of Leguminous Green Manure on Soil Ecosystem Multifunctionality in Apple Orchards[J]. Acta Pedologica Sinica，2026，63（6）：2041–2052.

# 豆科绿肥对苹果园土壤生态系统多功能性的影响及驱动机制*

王 菊[1]，于锦涛[1]，李明军[2]，杨培志[1]，翟丙年[3]，李紫燕[1†]

（1. 西北农林科技大学草业与草原学院，陕西杨凌 712100；2. 西北农林科技大学园艺学院，陕西杨凌 712100；3. 西北农林科技大学资源环境学院，陕西杨凌 712100）

**摘 要：**绿肥覆盖已成为绿色果园管理的有效栽培模式，但其对土壤质量和生态系统多功能性的影响及机制尚不明确。通过田间定位试验，探究了半干旱地区绿肥覆盖（无绿肥覆盖、禾本科（黑麦草）覆盖、豆科（白三叶）覆盖、禾本科与豆科混播（质量比 1∶1）覆盖）对土壤生态系统多功能性的影响。结果表明，绿肥覆盖显著提高了土壤质量，豆科单播较禾本科单播和禾本科豆科混播分别提高了 89.0%和 88.5%；同时，绿肥覆盖能够提升土壤酶活性并缓解微生物碳氮限制，分别缓解了 5.8%～8.6%的碳限制和 5.0%～14.7%的氮限制。综上，绿肥覆盖通过改善土壤理化性质和减轻微生物碳氮养分限制，进而提高了土壤生态系统多功能性（提高了 87.4%～100.2%）。本研究为半干旱果园提升土壤生态系统多功能性提供了绿色技术手段，其中绿肥覆盖首选豆科单播或混播豆科。

**关键词：**土壤质量；碳组分；酶活性；酶化学计量；微生物代谢限制

**中图分类号：**X144；S158 **文献标志码：**A

# Effects and Driving Mechanisms of Leguminous Green Manure on Soil Ecosystem Multifunctionality in Apple Orchards

WANG Ju[1], YU Jintao[1], LI Mingjun[2], YANG Peizhi[1], ZHAI Bingnian[3], LI Ziyan[1†]

(1. *College of Grassland Agriculture*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 2. *College of Horticulture, Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*; 3. *College of Natural Resources and Environment*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

**Abstract:** 【Objective】Intensive orchard management in semi-arid regions has caused soil quality degradation and declining ecosystems' multifunctionality, thereby threatening production sustainability. While green manure mulching shows promise for sustainable orchard management, the mechanistic impact on soil quality and ecosystem multifunctionality remains unclear.

* 国家重点研发计划项目（2023YFD2301000，2021YFD190070405）和国家自然科学基金项目（42577394）资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China（Nos. 2023YFD2301000 and 2021YFD190070405）and the National Natural Science Foundation of China（No. 42577394）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：liziyan0161@126.com

作者简介：王 菊（1993—），女，贵州贵阳人，硕士研究生，主要研究方向为绿肥与土壤健康。E-mail：2252338176@qq.com

收稿日期：2025–09–11；收到修改稿日期：2025–12–11；网络首发日期（www.cnki.net）：2026–01–22

【Method】This study investigated the impact of four green manure mulching treatments- no mulching, gramineae monoculture (ryegrass, *Lolium perenne* L.), legume monoculture (white clover, *Trifolium repens* L.), gramineae-legume mixture(1: 1)on soil quality and ecosystem multifunctionality in semi-arid orchards.【Result】The results revealed that green manure mulching substantially enhanced soil quality, with legume monoculture showing superior performance(89.0% and 88.5% increases versus grass and mixed systems, respectively). All treatments stimulated soil enzyme activities and alleviated microbial limitations (carbon: 5.8%-8.6%; nitrogen: 5.0%-14.7%), collectively increasing ecosystem multifunctionality by 87.4%-100.2%.【Conclusion】This study reveals that green manure mulching effectively enhances soil ecosystem multifunctionality in semi-arid orchards, with legume-based systems(monoculture or mixed)recommended for implementation.

**Key words:** Soil quality; Carbon fractions; Enzyme activity; Enzymatic stoichiometry; Microbial metabolic limitation

传统果园为提高果树产量，在生产中投入大量化肥，造成土壤养分失衡，土壤理化性质和微生物多样性破坏，加剧了土壤退化，威胁土壤健康和生态系统多功能性[1]。提升土壤健康水平是保障果园高产稳产和生态系统多功能性的基础。绿肥通过其内源驱动机制，能够活化与循环土壤-环境养分，改良土壤物理结构，并优化土壤生物群落结构与功能[2]。目前，关于果园绿肥覆盖的研究多集中在碳固存、共生固氮和土壤氮素循环等方面，而绿肥覆盖调控土壤质量、微生物代谢和土壤生态系统多功能性的研究尚未得到充分探索。另一方面，果园绿肥覆盖的应用效果极大程度受制于田间管理措施（例如施肥），因为果园绿肥与果树生长之间存在养分竞争关系，致使该技术在农业实际推广与应用中的效果参差不齐[3]。因而，基于中国国情的化肥减施增效科学管理技术体系，有必要进一步研究化肥减施状态下绿肥覆盖对土壤质量、微生物代谢和生态系统多功能性的影响，为实现果业的可持续高质量发展奠定基础。

土壤质量指数（SQI）是保障土壤生态安全和资源可持续利用的关键能力指标，已被纳入土壤健康评价体系范畴[4]。在农业生产中，Sinsabaugh 等[5]基于生态化学计量学（元素计量平衡）与生态代谢理论，发展形成生态酶化学计量理论，利用多种关键水解酶活性的比值（酶计量比），定量表征了土壤微生物在碳、氮、磷养分代谢过程中所面临的限制强度，并以此评价土壤质量。这项全球尺度的研究首次表明，lnBG：ln（NAG+LAP）：lnAKP（BG，β-1，4-葡萄糖苷酶；NAG，β-1，4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶；LAP，亮氨酸氨基肽酶；AKP，碱性磷酸酶）之间存在近似 1∶1∶1 的比例关系，并证实土壤养分可利用性、pH 和微生物生物量计量是调控酶活性的核心驱动因子。土壤关键水解酶的活性比例偏离生态化学计量平衡点（如 1∶1∶1），这指示土壤微生物群落正受到碳、氮或磷养分中的一种限制。酶活性矢量分析可有效揭示微生物群落的短期需求动态，该特征是表征其资源获取策略的重要指标。因此，研究土壤微生物代谢限制可有效表征绿肥覆盖对土壤健康的影响。

生态系统多功能性（EMF）是生态系统对多重生态系统功能的支持能力，即关注生态系统中发生的一系列生物、地球化学和物理过程[6]。土壤生态系统多功能性的核心评估维度聚焦于土壤碳、氮、磷元素循环过程，其重要表征指标包括参与这些养分循环的关键水解酶（如 BG、CBH（纤维二糖水解酶）、NAG、LAP、AKP 等）的活性水平。然而，先前的研究主要侧重于土壤养分、酶活性和土壤生态系统多功能性的差异，对于土壤质量、微生物代谢限制与土壤生态系统多功能性之间的关联则较少关注。

中国黄土高原渭北旱塬是苹果的主要产地之一，自然地理条件优越，该地区苹果产业的发展壮大影响着黄土高原苹果产区的绿色发展、群众的经济收入以及乡村振兴的推进。本研究基于陕西省渭南市白水县杜康镇和家卓村已开展 5 年的化肥减施定位试验，旨在探明不同绿肥覆盖处理下：（1）土壤养分、酶活性及土壤质量指数的响应差异；（2）微生物代谢限制与生态系统多功能性的变化规律及其驱动因素；（3）土壤质量指数、微生物碳氮限制与生态系统多功能性三者之间的内在关联。因此，开展绿肥覆盖对苹果园生态系统多功能性的影响研究，可为中国果业行间覆盖制度提供重要理论指导

和技术支撑，也可为黑麦草（*Lolium perenne* L.）、白三叶（*Trifolium repens* L.）单播、混播技术的推广应用以及黄土高原苹果区生态系统可持续发展提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区概况

研究区位于陕西省渭南市白水县杜康镇和家卓村（35°21′ N，109°52′ E），属于暖温带大陆性季风气候，多年平均降水量 577.8 mm，降水集中在 6—9 月份，试验地土壤类型为塿土。试验前 0～20 cm 土层的基本理化性质为：有机碳（SOC）13.00 g·kg$^{-1}$，全氮（TN）1.00 g·kg$^{-1}$，碱解氮（AN）24.90 mg·kg$^{-1}$，有效磷（AP）15.90 mg·kg$^{-1}$，速效钾（AK）232.30 mg·kg$^{-1}$，pH 8.30。

### 1.2　试验设计

试验地所用果园于 1991 年建植，果园占地 0.33 hm$^2$，园内栽培品种为长富 2 号，约 280 棵树，株行距 3 m×4 m，行间自然生草覆盖，宽度 2 m。2019 年布置化肥减施试验，于每年秋季施入基肥，每年坐果期、膨果期追肥，纯氮（N）（秋季基肥：坐果期追肥：膨果期追肥=60%：20%：20%（质量比，下同））、纯磷（$P_2O_5$）（秋季基肥 100%）、纯钾（$K_2O$）（秋季基肥：坐果期追肥：膨果期追肥=20%：30%：50%）投入量分别为 450、360、225 kg·hm$^{-2}$，较传统农户施肥投入量分别减少 180、270、405 kg·hm$^{-2}$。

2024 年 3 月中旬于化肥减施试验基础上进行绿肥覆盖试验，试验共设计 4 个处理：无绿肥（CK）覆盖、禾本科（黑麦草，HM）覆盖、豆科（白三叶，SY）覆盖、禾本科与豆科混播（黑麦草+白三叶（质量比 1∶1）混播，HB）覆盖，采用随机区组设计，每个处理设计 3 次重复，采用撒播的方式播种。绿肥处理在苹果树行间播种草种，黑麦草播种量为 225 kg·hm$^{-2}$，白三叶播种量为 22.5 kg·hm$^{-2}$，黑麦草+白三叶混播各自播种量减半，每行生草宽度 2 m，在各草幼苗期人工去除杂草，无绿肥覆盖处理及时中耕除草。果园用水源于自然降雨。

### 1.3　样品采集与测定

于 2024 年苹果膨果期（绿肥盛花期）按规范采集土壤与植株样品。采样前，清除地表覆盖物（含凋落物、根系等杂质）。随后，使用直径 5 cm 的土钻垂直钻取 0～20 cm 土层样品。每个小区依据多点混合采样法（5 点）采集土壤，混合样分装为两份：一份放置于 4 ℃冰箱，用于土壤含水量（SWC）、AN、微生物生物量和碳氮磷循环酶活性等指标测定。另一份自然风干，过筛后用于土壤其他理化指标（SOC、TN、AP 等）的测定。SOC 依据重铬酸钾容量法（外加热法）测定，TN 采用凯氏定氮法测定，AN 采用碱解还原扩散法测定，AP 采用钼锑抗比色法测定，AK 则通过火焰光度法测定。溶解性有机碳（DOC）采用蒸馏水浸提法测定，土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷（MBC、MBN 和 MBP）采用氯仿熏蒸法测定。易氧化有机碳（ROC）采用高锰酸钾氧化—分光光度法测定。惰性有机碳（NOC）通过 SOC 与 ROC 的代数差值计算获得。颗粒有机碳（POC）和矿物结合态有机碳（MAOC）采用六偏磷酸钠分散、过筛，重铬酸钾外加热法测定。土壤含水量（SWC）使用烘箱 105 ℃干燥 24 h 测定，土壤 pH 通过探针（水土质量比（2.5∶1））测定（Mettler Toledo FE28 标准）[7]。采用微孔板荧光法测定土壤酶活性：β-1，4-葡萄糖苷酶（BG）、纤维二糖苷酶（CBH）、亮氨酸氨肽酶（LAP）、β-1，4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶（NAG）、碱性磷酸酶（AKP）[8]，黑暗条件培养 4 h，通过多功能酶标仪（Spark，Tecan，澳大利亚）进行测定。

在每个小区内选择长势均匀的绿肥，于 1 m$^2$ 标准样方内，齐地面收割所有地上植株，采集带回实验室，经杀青、烘干后，通过称量法计算绿肥地上部生物量（AGB）。

### 1.4　数据分析

为明确不同绿肥覆盖对土壤质量的改良作用，本文通过相对系数法将生态系统各因子量纲归一化，得到生态系统各因子指标的隶属度值[9]：

$$F(X_{ab})=\frac{X_{ab}-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \quad (1)$$

$$F(X_{ab})=1-\left[\frac{X_{ab}-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}}\right] \quad (2)$$

式中，$F(X_{ab})$ 表示第 $a$ 个土壤样品的第 $b$ 项指标

的隶属函数值；$X_{ab}$ 为原始测定值；$X_{max}$ 和 $X_{min}$ 分别代表该指标在所有样品中的最大值和最小值。若指标与 SQI 呈正相关，采用式（1）计算；若呈负相关（如 pH），则采用式（2）计算。

进一步根据因子分析所得公因子方差，确定各指标权重，使用如下公式进行计算：

$$\mathrm{SQI}=\sum_{a=1}^{n}\sum_{b=1}^{n}F\left(X_{ab}\right)\times W\left(X_{ab}\right) \quad (3)$$

式中，$W(X_{ab})$ 表示第 $a$ 个土壤样品的第 $b$ 项指标的权重值，$n$ 为样品总数。

为量化不同绿肥覆盖下土壤碳、氮和磷循环相关酶活性，分别使用平均酶活性（EEAs）进行表征，参照下列计算公式[10]：

$$\mathrm{C-acq}=\sqrt{\mathrm{BG}\times\mathrm{CBH}} \quad (4)$$

$$\mathrm{N-acq}=\sqrt{\mathrm{NAG}\times\mathrm{LAP}} \quad (5)$$

$$\mathrm{P-acq}=\sqrt{\mathrm{AKP}\times\mathrm{AKP}} \quad (6)$$

式中，C-acq 为碳循环相关酶（BG 和 CBH）活性，nmol·g$^{-1}$·h$^{-1}$；N-acq 为氮循环相关酶（NAG 和 LAP）活性，nmol·g$^{-1}$·h$^{-1}$；P-acq 为磷循环相关酶（AKP）活性，nmol·g$^{-1}$·h$^{-1}$。

通过酶化学计量比进一步分析不同绿肥覆盖下微生物代谢限制情况[11]，公式如下：

$$x=\frac{\mathrm{BG}+\mathrm{CBH}}{\mathrm{BG}+\mathrm{CBH}+\mathrm{AKP}} \quad (7)$$

$$y=\frac{\mathrm{BG}+\mathrm{CBH}}{\mathrm{BG}+\mathrm{CBH}+\mathrm{NAG}+\mathrm{LAP}} \quad (8)$$

$$\mathbf{VL}=\sqrt{x^2+y^2} \quad (9)$$

$$\mathbf{VA}=Degrees\left[atan2(x,y)\right] \quad (10)$$

式中，x 代表碳循环相关酶活性/（碳循环相关酶活性+磷循环相关酶活性），y 表示碳循环相关酶活性/（碳循环相关酶活性+氮循环相关酶活性），**VL** 为向量长度，**VA** 为向量角度，单位为°。**VL** 值越大，表示微生物碳限制越强。**VA** 小于 45°指示氮限制（角度越小限制越强），大于 45°则表示磷限制（角度越大限制越强）。

最后，基于土壤酶活性计算土壤生态系统多功能性（EMF）[12-13]，计算公式如下：

$$\mathrm{EMF}=0.05\times\sum_{i}^{n}\left(\frac{R_i}{R}\right)^2\times\sin\left(\frac{2\times\pi}{n}\right) \quad (11)$$

式中，$R_i$ 代表某指标在不同绿肥覆盖处理下的实测值，$R$ 为该指标在所有处理中的最大值，$n$ 为指标总数。

### 1.5 统计分析

所有数据在分析前均通过了 Levene 检验（方差齐性）和 Shapiro-WilK 检验（正态性）。为评估不同绿肥覆盖对土壤养分含量、SQI、向量长度、向量角度和 EMF 的作用，采用单因素方差分析（one-way ANOVA）进行组间比较，并运用邓肯（Duncan）多重比较法（$P<0.05$）判定处理间差异显著性。相关柱状图使用 Origin 2024 绘制。冗余分析（RDA）、随机森林模型、曼特尔检验（Mantel-test）组合图和皮尔逊（Pearson）相关性分别采用 R 语言（版本 4.4.1）中的“vegan”“randomForest”“ggcor”和“corrplot”包进行绘制。SQI、向量长度、向量角度与 EMF 之间的关系通过线性回归进行分析检验。

## 2 结 果

### 2.1 绿肥覆盖对土壤养分和土壤质量的影响

绿肥覆盖几乎对所有土壤理化性质、微生物生物量均有影响（表 1）。结果表明，绿肥覆盖提高土壤 TN、AN、AP、AK、DOC、MBC、MBN、MBP、SWC 含量，混播处理显著降低土壤 pH。相比 HM，SY 显著提高土壤 POC、ROC 和 NOC，分别提高 28.64%、2.17%和 2.33%；相比 HB，SY 显著提高土壤 POC、ROC 和 NOC，分别提高 23.12%、2.95%和 12.60%；相比 SY 和 HB，HM 显著提高土壤 MAOC，分别提高 26.45%和 20.78%。HM 的地上部生物量显著高于 SY 和 HB 处理。

图 1 表明，相比 CK，不同绿肥覆盖的 SQI 均显著提高，趋势为：SY>HB>HM>CK，SY 较 HM 和 HB 分别提高了 88.52%和 89.01%（$P<0.05$）。

**表 1　不同绿肥对土壤理化性质、微生物生物量、酶活性指标及地上部生物量的影响**

**Table 1**　Impacts of different green manure mulching on soil physicochemical properties，microbial biomass，soil enzyme activity indicators，and above-ground biomass

| 处理 Treatment | SWC/（g·kg$^{-1}$） | pH | SOC/（g·kg$^{-1}$） | TN/（g·kg$^{-1}$） | AN/（mg·kg$^{-1}$） | AP/（mg·kg$^{-1}$） | AK/（mg·kg$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 196.3±1.3c | 8.50±0.03a | 10.28±0.45c | 0.76±0.01c | 11.47±0.85c | 32.22±0.64d | 367.44±4.63d |
| HM | 203.9±3.5b | 8.46±0.03ab | 11.21±0.20ab | 0.82±0.01b | 14.12±0.63a | 44.93±0.12a | 409.03±2.67c |
| SY | 215.6±2.3a | 8.44±0.03ab | 11.47±0.39a | 1.02±0.02a | 13.08±0.21ab | 40.90±0.24b | 611.29±4.63a |
| HB | 202.0±0.9b | 8.43±0.03b | 10.42±0.28bc | 0.83±0.01b | 12.73±0.16b | 35.02±0.26c | 526.23±4.63b |

| 处理 Treatment | DOC/（mg·kg$^{-1}$） | POC/（g·kg$^{-1}$） | MAOC/（g·kg$^{-1}$） | ROC/（g·kg$^{-1}$） | NOC/（g·kg$^{-1}$） | MBC/（mg·kg$^{-1}$） | MBN/（mg·kg$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 74.18±1.12c | 5.11±0.05c | 5.17±0.42b | 2.74±0.01c | 7.54±0.44c | 36.74±1.58c | 22.22±1.49c |
| HM | 93.39±2.93ab | 5.25±0.12bc | 5.96±0.10a | 2.78±0.01b | 8.43±0.21ab | 96.13±2.97b | 28.65±1.81b |
| SY | 95.25±1.79a | 6.75±0.15a | 4.71±0.38b | 2.84±0.01a | 8.63±0.39a | 95.58±1.34b | 27.83±1.01b |
| HB | 90.69±1.34b | 5.49±0.18b | 4.93±0.36b | 2.76±0.01bc | 7.66±0.28bc | 100.91±1.69a | 33.22±2.39a |

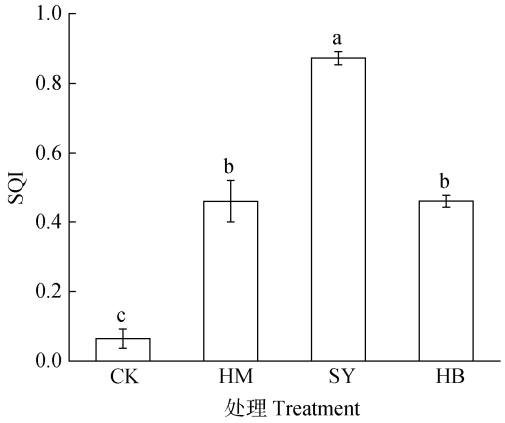
| 处理 Treatment | MBP/（mg·kg$^{-1}$） | C-acq/（nmol·g$^{-1}$·h$^{-1}$） | N-acq/（nmol·g$^{-1}$·h$^{-1}$） | P-acq/（nmol·g$^{-1}$·h$^{-1}$） | AGB/（t·hm$^{-2}$） |
|---|---|---|---|---|---|
| CK | 24.42±1.01d | 13.73±1.16c | 16.79±1.60c | 63.27±1.77c | |
| HM | 30.83±1.09c | 17.67±0.99b | 24.09±1.00a | 97.46±1.17b | 3.29±0.14a |
| SY | 41.37±1.07b | 23.34±0.56a | 20.24±1.88bc | 103.89±1.28a | 0.69±0.05c |
| HB | 55.02±1.64a | 21.52±0.45a | 21.39±1.76ab | 98.10±1.14b | 2.20±0.31b |

注：CK：无绿肥覆盖，HM：禾本科覆盖，SY：豆科覆盖，HB：禾本科与豆科混播覆盖。SWC：土壤含水量，SOC：土壤有机碳，TN：全氮，AN：碱解氮，AP：有效磷，AK：速效钾，DOC：溶解性有机碳，POC：颗粒有机碳，MAOC：矿物结合态有机碳，ROC：易氧化有机碳，NOC：惰性有机碳，MBC：微生物生物量碳，MBN：微生物生物量氮，MBP：微生物生物量磷，C-acq：碳循环酶，N-acq：氮循环酶，P-acq：磷循环酶，AGB：绿肥地上部生物量。数据以平均值±标准误表示（$n$ = 3）；同列小写字母标识组间统计学差异（$P < 0.05$）。下同。Note：CK：no mulching，HM：gramineae monoculture，SY：legume monoculture，HB：legume-gramineae mixture. SWC：Soil water content，SOC：Soil organic carbon，TN：Total nitrogen，AN：Alkali-hydrolyzable nitrogen，AP：Available phosphorus，AK：Available potassium，DOC：Dissolved organic carbon，POC：Particulate organic carbon，MAOC：Mineral-associated organic carbon，ROC：Soil readily oxidizable organic carbon，NOC：Soil inert carbon，MBC：Microbial biomass carbon，MBN：Microbial biomass nitrogen，MBP：Microbial biomass phosphorus，C-acq：Carbon acquisition enzyme，N-acq：Nitrogen acquisition enzyme，P-acq：Phosphorus acquisition enzyme，AGB：Above ground biomass of green manure. Values represent mean ± standard error（$n$ = 3）；Lowercase letters in the same column are used to show significant differences with treatments（$P < 0.05$）. The same below.

### 2.2　绿肥覆盖对土壤酶活性和微生物代谢限制的影响

绿肥覆盖对不同酶活性有不同影响（表 1）。绿肥覆盖较 CK 可不同程度提高土壤 C-acq、N-acq 和 P-acq 酶活性（除 SY 处理中 N-acq 不显著外）。相比 CK，绿肥覆盖下土壤 C-acq 和 P-acq 酶活性显著提高了 28.70%～70.06%和 54.03%～64.18%；相比 CK，HM 和 HB 可显著提高土壤 N-acq 酶活性 43.44%和 27.37%，而 SY 无显著影响。同时，相比 HM，SY 和 HB 分别可显著提高 C-acq 酶活性 32.14%和 21.82%。

基于酶化学计量学分析，CK 与 HM 样点均分布于 1∶1 线下方（图 2a），显示微生物代谢存在显著氮限制，而 SY 和 HB 更有利于维持微生物养分均衡状态。绿肥覆盖较 CK 对微生物碳氮限制的缓解作用更优（图 2b 和图 2c），其中，SY 和 HB 对氮限制的缓解效果强于 HM（图 2b）。回归分析进一步揭示向量长度与角度呈负相关关系（图 2d）。




注：不同小写字母标识组间统计学差异显著（$P < 0.05$）。下同。Note：Lowercase letters are used to show significant differences with treatments（$P < 0.05$）. The same below.

图 1 不同绿肥覆盖对苹果园土壤质量指数（SQI）的影响

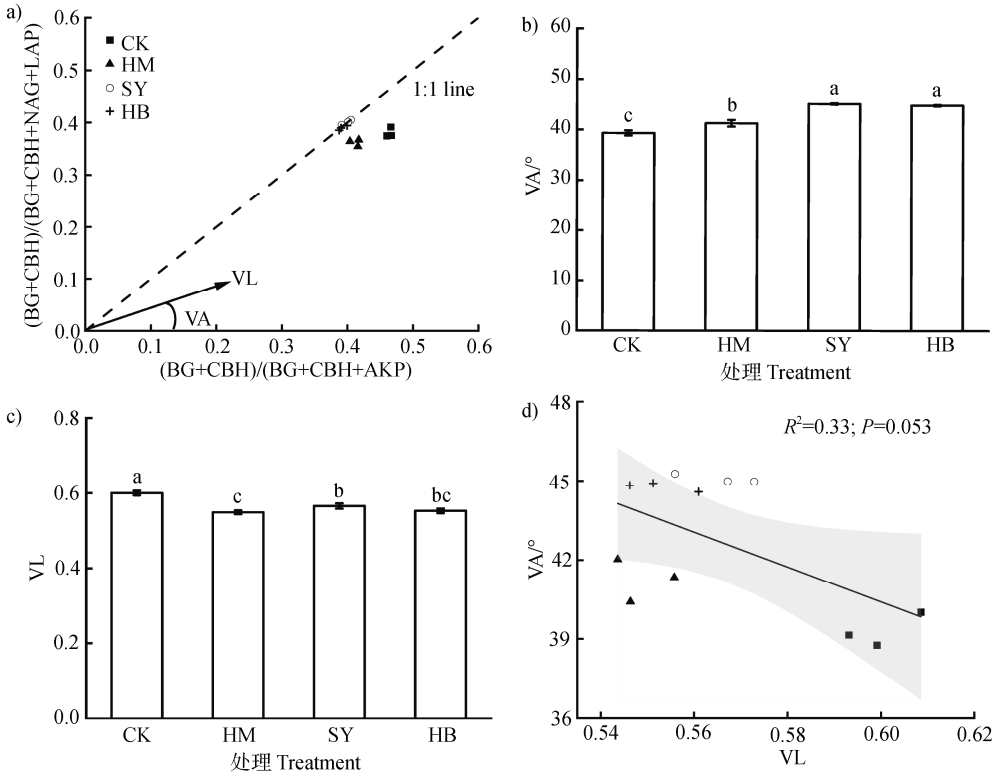
Fig. 1 Response of soil quality index（SQI）to different green manure mulching of apple orchard

### 2.3 土壤微生物代谢限制与土壤环境因子的关系

微生物碳、氮、磷获取过程及养分限制状态受多种土壤因子驱动。RDA 结果表明，土壤有效养分（AN、AK、AP）和活性碳库组分（DOC、POC、MBC、ROC）是其主要影响因子，且 AN 和 AP 与 N-acq 正相关，POC、ROC、MBC、DOC 和 MBP 与 C-acq 正相关（$P < 0.05$，图 3a）。随机森林分析显示，TN、MBP、AK 和 POC 是影响向量角度的主要土壤因子，AK、MBN、MBC、AP、SWC、DOC 和 AN 是影响向量长度的主要土壤因子（图 3b 和图 3c）。回归分析表明，向量长度随着 SQI 升高而下降（$P < 0.05$，图 4a），向量角度随着 SQI 升高而增大（$P < 0.001$，图 4b），这表明土壤质量的改善有助于缓解微生物的碳氮限制。

### 2.4 绿肥覆盖对土壤生态系统多功能性的影响

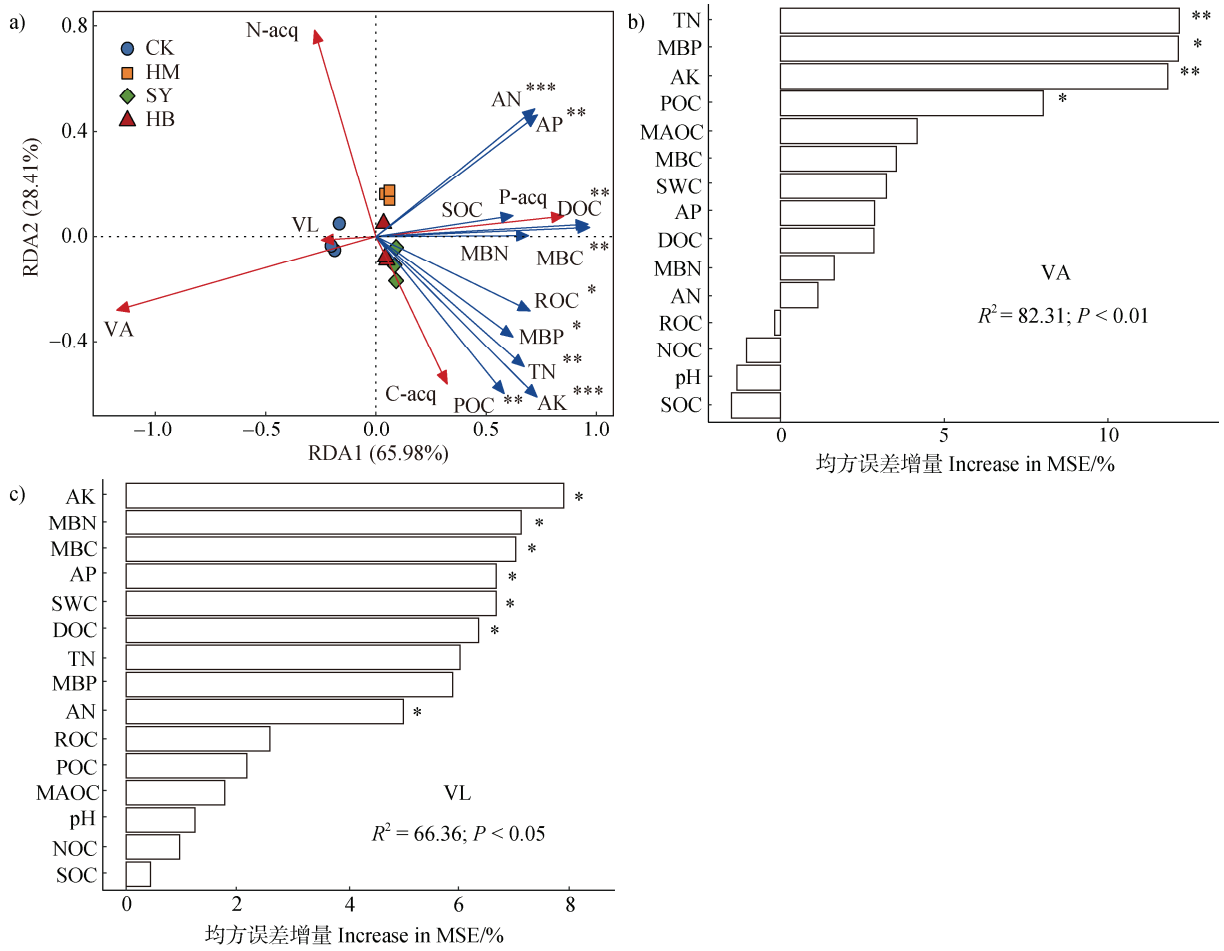
与 CK 相比，采用绿肥覆盖可显著提升土壤




注：BG：β-1，4-葡萄糖苷酶，CBH：纤维二糖苷酶，NAG：β-1，4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶，LAP：亮氨酸氨肽酶，AKP：碱性磷酸酶，1∶1 line：1∶1 线，**VL**：向量长度，**VA**：向量角度。图 d 阴影区域表征统计学置信区间（95%）。下同。Note：BG：β-glucosidase，CBH：cellobiosidase，NAG：1，4-beta-N-acetyglucosaminidase，LAP：leucine-aminopeptidase，AKP：alkaline phosphatase，**VL**：Vector length，**VA**：Vector angle. The shaded areas（d）show 95% confidence intervals of the fit in the linear regression analysis. The same below.

图 2 绿肥覆盖下苹果园土壤酶化学计量（a）与向量分析（b. **VA**，c.**VL**，d. **VA** 与 **VL** 的相关性）

Fig. 2 Soil enzymatic stoichiometry（a）and vector analysis（b. **VA**，c.**VL**，d. Correlation between **VA** and **VL**）in an apple orchard with green manure mulching




注：RDA：冗余分析。蓝色箭头表征土壤因子及微生物生物量，红色箭头指示酶活性与向量特征。*表示 $P < 0.05$，**表示 $P < 0.01$，***表示 $P < 0.001$。Note：RDA：Redundancy analysis. Blue arrows represent soil physicochemical properties and microbial biomass; red arrows denote soil enzymatic activities and vector metrics. * indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$, *** indicates $P < 0.001$.

图 3　土壤酶活性和向量特征与土壤因子和微生物生物量的关联（a. 冗余分析，b.和 c. 随机森林）

Fig. 3　Relationship between soil enzyme activities and vector characteristics with soil factors and microbial biomass (a. Redundancy analysis, b. and c. Random forest)

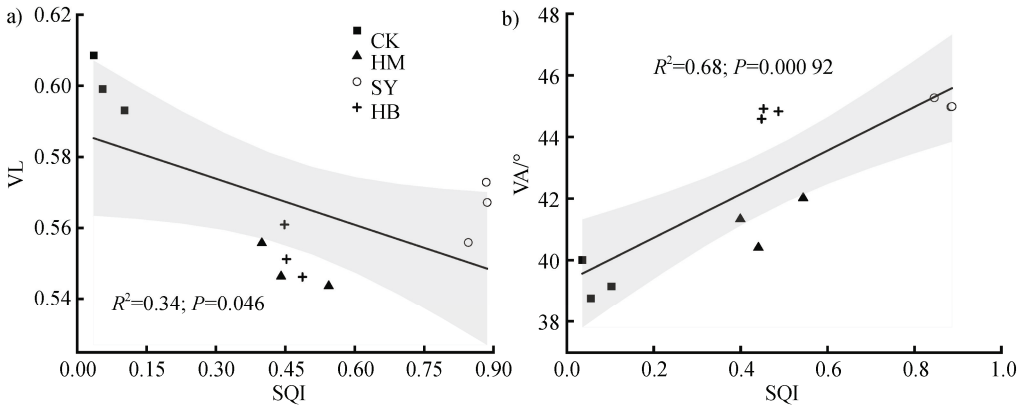



图 4　土壤质量指数与向量参数（a. **VL**，b. **VA**）的回归关系

Fig. 4　Regression relationships between soil quality index (SQI) and vector parameters (a. **VL**, b. **VA**)

EMF（图 5）。其中，HM、SY 和 HB 处理的土壤 EMF 分别较 CK 显著提高了 89.35%、100.15%和 87.41%。Mantel-test 检验分析表明，AN、AP、AK、DOC、MBC、MBN 和 pH 是影响土壤 EMF 的主要驱动力（图 6a）。相关性分析进一步显示，土壤 EMF 与 AN、AP、AK、DOC、MBC 和 MBN 均呈显著正相关，而与 pH 呈显著负相关（图 6e）。回归分析结果表明，EMF 随 SQI 和向量角度增加而上升（图 6b 和图 6d），但随着向量长度的增加而下降（图 6c），这表明提升土壤质量及缓解微生物碳氮限制有助于增强土壤生态系统的多功能性；同时，SY 和 HB 通过影响土壤质量和微生物代谢提升土壤 EMF 的效果强于 HM（图 6b，图 6c 和图 6d）。

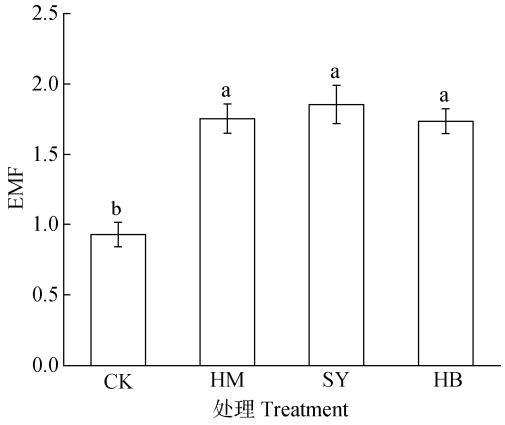



图 5 绿肥覆盖对土壤生态系统多功能性（EMF）的影响

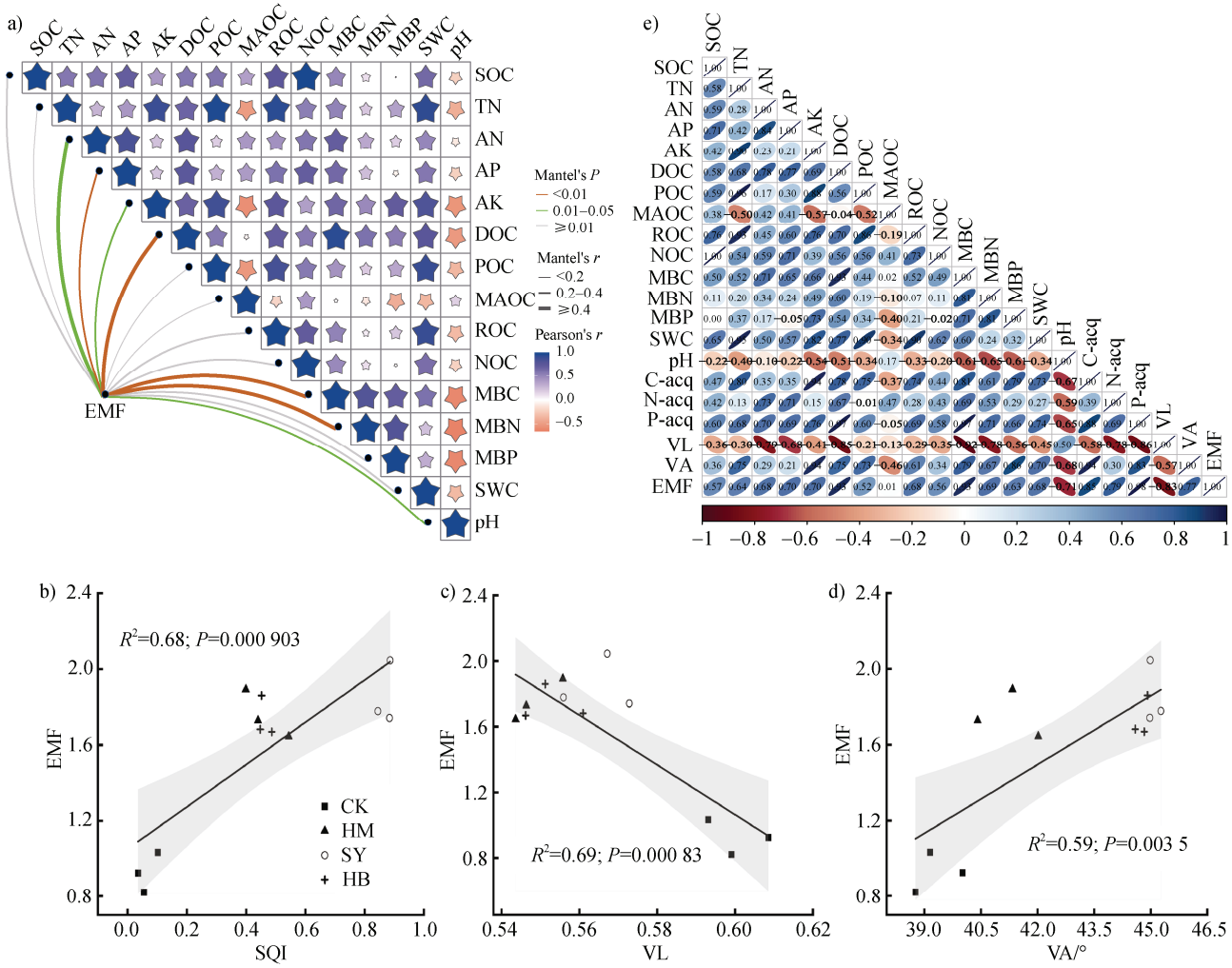
Fig. 5 Effects of green manure mulching on soil ecosystem multifunctionality（EMF）

## 3 讨 论

### 3.1 绿肥覆盖对土壤养分和土壤质量的影响

绿肥覆盖（HM、SY 和 HB）增加了 TN、AN、AP、DOC、SWC、MBC、MBN 和 MBP 含量，但对 pH 有消极影响（表 1）。SY 处理的 AN 含量显著高于 CK 处理，表明种植白三叶有助于土壤矿质氮的提升[14]。此外，土壤碳、氮、磷循环之间存在密切的生物地球化学关联，绿肥在调节土壤氮素的同时，也必然会对碳和磷的循环过程产生间接影响（图 6e）。豆科绿肥覆盖前期，对磷需求大，土壤中 AP 以正磷酸盐形式被植物根系吸收利用，表现为豆科绿肥白三叶的土壤 AP 含量显著低于禾本科绿肥黑麦草（表 1），表明 HM 对有机态磷的矿化作用强于 SY[15]；同时，与禾本科非结瘤绿肥相比，豆科绿肥对磷的需求更多，原因在于磷在根瘤能量转化中起着至关重要的作用[16]。DOC 是土壤中含有羧基、羰基和羟基的一种活性有机成分，是土壤微生物的直接碳源，其含量是决定土壤肥力和质量的关键因素之一，SOC 是 DOC 的重要补充来源[17]。绿肥覆盖带来的显著有机物输入（主要为枯落物和根系），通过提供丰富的易矿化碳源，确保了土壤微生物代谢所需底物的有效供给。有研究表明，绿肥通过促进土壤生物活性，不仅缓解了微生物的磷限制，还维持了较高的微生物碳利用效率，从而增强了土壤碳封存过程；同时，绿肥的根系可产生数量多且种类丰富的分泌物，为微生物提供更多碳源和能源[18]。HM 和 SY 的 SOC 显著高于 CK，两者的 SWC 也显著高于 CK（表 1），表明土壤碳输入的增加，能提升土壤的持水能力，同时 SOC 与 SWC 有强正相关性（图 6e），这与一些研究发现覆盖作物可长期增加土壤水分的结论[19]一致。本研究中，SY 处理的 SWC 显著高于 HM 和 HB 处理（表 1），其原因可能是禾本科绿肥由于其自身根系较深且呈须状，蒸腾速率一般高于豆科绿肥，这与 Duval 等[20]的研究结果一致。

土壤微生物生物量是土壤有机质中最活跃的部分，主要包括 MBC、MBN 和 MBP，主要参与调控土壤内外部能量流动、转化及养分循环，反映土壤养分有效性的变化，表征土壤有机物质的代谢强度，是评价土壤质量和生态环境质量优劣的准确指标[21]。绿肥覆盖能有效增加果园土壤微生物数量，增强土壤微生物活性，并提升其群落功能多样性[22]，与本研究中土壤微生物生物量显著提高的结果（表 1）相吻合。HB 处理 pH 显著低于 CK（表 1），其原因可能是混播处理下，豆科与禾本科协同显著增强了固氮驱动的质子释放与硝化过程，为土壤微生物生长创造了更适宜的环境条件，加快了土壤微生物活动。混播的微生物生物量显著高于单播和无绿肥覆盖（表 1），可能是由于单播土壤中有机养分趋于稳定，可被微生物利用的相对较少[23]。冗余分析显示，绿肥覆盖均位于土壤环境因子和土壤酶活性因子箭头的正相关方向上（图 3c），直观地解释了绿肥覆盖对土壤质量的提升作用，其中，SY 和 HB 的提升作用优于 HM。




注：Mantel-test：曼特尔检验，Pearson：皮尔逊。图 a 中橙色线条表示 $P < 0.01$，绿色线条表示 $P < 0.05$，粗线条表示 $r \geqslant 0.4$，中等粗线条表示 $r = 0.2 \sim 0.4$。图 e 中蓝色右向椭圆指示正相关，红色左向椭圆表征负相关；颜色深浅度与几何尺寸反映关联强度。

Note: In Figure a, the orange lines indicate $P < 0.01$, while the green lines represent $P < 0.05$. Thick lines denote $r \geqslant 0.4$, and medium-thick lines correspond to $r = 0.2$-$0.4$. In Figure e, the blue right-pointing ellipses signify positive correlations, whereas the red left-pointing ellipses characterize negative correlations; both the color intensity and geometric dimensions indicate the strength of the associations.

图 6　土壤生态系统多功能性与土壤环境因子、土壤质量指数和向量参数的关联效应（a.曼特尔检验，b. SQI，c. **VL**，d. **VA**，e.皮尔逊相关性）

Fig. 6　Linkages between soil ecosystem multifunctionality, soil environmental factors, soil quality index, and vector parameters (a. Mantel-test, b. SQI, c. **VL**, d. **VA**, e. Pearson correlations)

### 3.2　绿肥覆盖对土壤酶活性和微生物代谢限制的影响

土壤酶参与土壤养分的分解转化和微生物代谢活动等过程，是反映土壤质量的重要指标 [24]。在表层土壤中，绿肥主要通过增加微生物生物量来提高土壤酶活性。本研究结果表明，绿肥覆盖通过增强土壤碳磷代谢相关酶活性，显著缓解了微生物的代谢限制（表 1 和图 2），土壤环境因子对酶活性及微生物养分限制状态（向量长度和角度）存在显著调控作用（图 3a）。绿肥覆盖下，土壤 C、P 循环相关酶活性显著高于 CK（表 1），与桃园[25]、柑橘园[26]在绿肥覆盖下均增加了土壤 C、P 循环相关酶活性的结论一致。土壤 pH 是影响覆盖模式下土壤酶活性的重要因子[27]，图 6e 表明，pH 与土壤 C、N、P 循环相关酶活性呈负相关关系，说明在一定 pH 范围内，pH 降低更有利于土壤 C、N、P 相关酶分解

释放[28]。SY 的氮循环酶活性与 CK 相比无显著差异（表 1），其原因可能是白三叶本身具备天然的固氮优势，豆科绿肥通常能为土壤贡献氮素。与 HM 相比，SY 通过固氮驱动的微生物激活，浅根系减少水分竞争及致密覆盖抑制蒸发，显著提高了土壤碳磷循环相关酶活性与土壤含水量（表 1）。DOC、MBC、POC 和 ROC 能为微生物生长提供碳源，影响酶的合成，是驱动碳循环酶活性的关键因素，AN 和 MBN 能为微生物生长提供氮源，是驱动氮循环酶活性的关键因素，AP 和 MBP 能为微生物生长提供磷源，驱动磷循环酶活性（图 3a）。有研究表明，土壤 C、N、P 相关指标能解释土壤酶活性的大部分变化[29]。

酶化学计量学结果（图 2a）表明，绿肥覆盖和无绿肥覆盖处理的微生物磷限制均处于较低水平，原因在于化肥减施下整体增加了土壤有效磷含量，直接缓解了微生物磷限制程度，这与其他研究结果[30]一致。土壤 C∶N∶P 作为有机质含量和质量的重要指标，可有效反映土壤养分矿化和固持之间的平衡关系。土壤酶活性计量比可用于表征微生物在碳、氮、磷养分利用中的资源分配策略与限制状态，揭示微生物在生长代谢过程中的养分需求及能量分配情况。该比值的变化可诱导微生物增强对限制性养分相关酶的分泌能力，以适应环境中养分的限制性条件，从而维持 C∶N∶P 平衡[31]。微生物碳氮限制的共同主要影响因素是 AK（图 3b 和图 3c），这与土壤胞外酶活性（EEAs）化学计量表明的结果一致，说明钾对微生物的生长和代谢至关重要。此外，绿肥覆盖下土壤氮素利用效率的提升强化了微生物氮代谢对磷素的需求，促使微生物通过上调磷循环酶以活化更多磷元素（表 1），驱动碳、氮、磷循环相关酶活性趋近 1∶1∶1 的化学计量关系[32]。

值得注意的是，向量长度与角度呈负相关（图 2d），表明微生物氮限制的降低伴随碳限制程度的减弱。同时，绿肥覆盖较 CK 显著缓解了微生物碳限制（图 2c），地上生物量的增加（表 1）对碳限制缓解具有正向作用，其潜在机制在于生物量的提升增加了凋落物输入量[33]。绿肥覆盖对缓解微生物碳、氮限制的显著效应，得益于土壤质量的改善。回归分析（图 4a 和图 4b）证实，土壤质量的提升可缓解微生物碳氮限制的程度。

### 3.3 绿肥覆盖下土壤质量和微生物代谢对土壤生态系统多功能性的影响及其驱动力

本研究发现，相比 CK，绿肥覆盖可更好地提升土壤 EMF（图 5）。土壤质量的提升与微生物碳氮限制的缓解有助于增强土壤生态系统多功能性（图 6b，图 6c 和图 6d）。AN、AP、AK、DOC、MBC、MBN 和 pH 是影响土壤 EMF 的关键驱动因子（图 6a）。绿肥通过种类特异性机制改善土壤健康。豆科作物白三叶通过共生固氮输入活性氮源，其根系分泌有机酸等物质，活化难溶性磷，显著提升 AN、AP 等养分有效性；禾本科作物黑麦草凋落物的腐解有助于提升碳稳定性，其根系有助于养分迁移[34]。土壤碳、氮、磷养分的有效性可通过调控微生物群落结构与活性，进一步驱动生物地球化学循环，并最终调控以土壤酶活性等为表征的生态系统关键过程，该结论与已有研究[35]一致。绿肥覆盖对土壤生态系统多功能性的促进作用（图 6b 和图 6e），是由土壤养分（如 TN、AN、AP、AK、SWC、DOC、MBC、MBN 和 MBP 等）改善驱动的。优良的土壤环境优化了微生物代谢效率，继而通过促进微生物多样性，并重塑其群落结构，最终形成了更高的土壤功能多样性[36]。已有研究指出，良好的土壤多功能性通常依赖于充足的土壤养分供应和高效的微生物代谢活动。相反，土壤质量较差、养分匮乏（如 CK），微生物会出现生态位分化、竞争加剧及资源获取受限等现象，具体表现为微生物碳氮限制增强，从而抑制土壤生态系统多功能性。此外，绿肥覆盖可有效缓解微生物碳氮限制，进而提升土壤生态系统多功能性（图 6c 和图 6d），原因在于绿肥覆盖可提升土壤养分，有助于增强土壤酶活性并改变微生物群落结构，最终影响土壤生态系统多功能性。绿肥覆盖下，根系分泌物增多，提高了土壤微生物的物种丰富度；同时，微生物碳氮限制的缓解提升了土壤微生物获取养分的能力，增强了土壤 C、N、P 循环过程（即更高的 C-acq、N-acq 和 P-acq 酶活性）[37]。

综上所述，绿肥覆盖能够通过改善土壤质量、调节微生物碳氮代谢限制，进而增强土壤生态系统的多功能性。同时，在将来的研究中，可着重探讨不同种植年限下绿肥覆盖与轮作模式对土壤质量、微生物代谢过程及生态系统多功能性的长期效应与机制差异。

## 4 结 论

绿肥覆盖显著提高了土壤 TN、AN、AP、AK、

DOC、MBC、MBN、MBP 和 SWC 含量，同时降低了土壤 pH。相比禾本科绿肥，豆科绿肥虽生物量较低，但其通过根瘤固氮实现等效氮提升，驱动氮循环酶活性升高，缓解微生物氮限制；其高碳输入进一步协同缓解碳限制，最终通过优化微生物代谢效率提升土壤生态系统的多功能性。土壤中的 AK 含量是调控微生物碳氮限制和生态系统多功能性的共同关键因子。综合而言，绿肥覆盖可通过改善土壤质量和微生物代谢提升土壤生态系统多功能性，其中，白三叶覆盖和黑麦草+白三叶混播（质量比 1∶1）覆盖的综合提升效果最好。该结果可为半干旱果园考虑绿肥覆盖措施以增强土壤生态系统多功能性提供理论参考。

## 参考文献（References）


[1] Gupta G，Dhar S，Kumar A，et al. Microbes-mediated integrated nutrient management for improved rhizo-modulation，pigeonpea productivity，and soil bio-fertility in a semi-arid agro-ecology[J]. Frontiers in Microbiology，2022，13：924407.

[2] Cao W D，Zhou G P，Gao S J. Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2024，30（7）：1274—1283. [曹卫东，周国朋，高嵩涓. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制[J]. 植物营养与肥料学报，2024，30（7）：1274—1283.]

[3] Wairegi L W I，van Asten P J A. The agronomic and economic benefits of fertilizer and mulch use in highland banana systems in Uganda[J]. Agricultural Systems，2010，103（8）：543—550.

[4] Bünemann E K，Bongiorno G，Bai Z G，et al. Soil quality–A critical review[J]. Soil Biology & Biochemistry，2018，120：105—125.

[5] Sinsabaugh R L，Hill B H，Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. Nature，2009，462（7274）：795—798.

[6] Sanderson M A，Skinner R H，Barker D J，et al. Plant species diversity and management of temperate forage and grazing land ecosystems[J]. Crop Science，2004，44（4）：1132—1144.

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

[8] German D P，Weintraub M N，Grandy A S，et al. Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies[J]. Soil Biology & Biochemistry，2011，43（7）：1387—1397.

[9] Li Z G，Xie Y Z. Improving desertified soil properties by incorporating and mulching tree branch in Ningxia Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2015，31（10）：174—181. [李志刚，谢应忠. 翻埋与覆盖林木枝条改善宁夏沙化土壤性质[J]. 农业工程学报，2015，31（10）：174—181.]

[10] Huang B B，Xing Y J，Luo W，et al. Effects of long-term nitrogen addition and throughfall reduction on extracellular enzyme activity and ecoenzymatic stoichiometry in a temperate forest[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition，2024，24（1）：1534—1546.

[11] Ma Z Z，Zhang X C，Zheng B Y，et al. Effects of plastic and straw mulching on soil microbial P limitations in maize fields：Dependency on soil organic carbon demonstrated by ecoenzymatic stoichiometry[J]. Geoderma，2021，388：114928.

[12] Garland G，Banerjee S，Edlinger A，et al. A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality：A review[J]. Journal of Ecology，2021，109（2）：600—613.

[13] Chu J C，Zhou J，Wang Y，et al. Field application of biodegradable microplastics has no significant effect on plant and soil health in the short term[J]. Environmental Pollution，2023，316：120556.

[14] [14]Gong Q L，Zhai B N，Zheng W，et al. Effects of grass cover combined with different fertilization regimes on soil nutrients and enzyme activities in apple orchard in Weibei dryland，China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2018，29（1）：205—212. [巩庆利，翟丙年，郑伟，等. 渭北旱地苹果园生草覆盖下不同肥料配施对土壤养分和酶活性的影响[J]. 应用生态学报，2018，29（1）：205—212.]

[15] Ren J，Li F D，Yin C B. Orchard grass safeguards sustainable development of fruit industry in China[J]. Journal of Cleaner Production，2023，382：135291.

[16] Wang L L，Xie J H，Luo Z Z，et al. Forage yield，water use efficiency，and soil fertility response to alfalfa growing age in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management，2021，243：106415.

[17] Zhou Y，Chu K J，Su L H，et al. Effects of agronomic measures on soil dissolved organic matter：A review[J]. Soils，2022，54（3）：437—445. [周悦，褚克坚，苏良湖，等. 农艺措施对土壤可溶性有机质的影响研究进展[J]. 土壤，2022，54（3）：437—445.]

[18] Li G L，Wang Y J，Leng K，et al. Characteristics of soil bacterial communities regulate soil multifunctionality under green manure catch cropping[J]. Soils，2024，56（6）：1253—1261. [李桂龙，王于娟，冷珂，等. 绿肥填闲种植下土壤细菌群落特性对土壤多功能性的调控[J]. 土壤，2024，56（6）：1253—1261.]

[19] Augé R M，Stodola A J W，Tims J E，et al. Moisture retention properties of a mycorrhizal soil[J]. Plant and Soil，2001，230（1）：87—97.

[20] Duval M E，Galantini J A，Capurro J E，et al. Winter cover crops in soybean monoculture：Effects on soil organic carbon and its fractions[J]. Soil & Tillage Research，2016，161：95—105.

[ 21 ] Chen Y Q，Xu L Y，Wang Z W，et al. Stoichiometric characteristics of nutrient-microbial biomass-extracellular enzyme activity in different salt-affected soils[J]. Acta Pedologica Sinica，2025，62( 3 )：811—824. [陈玉琪，徐灵颖，王志旺，等. 不同盐渍化土壤养分–微生物生物量–胞外酶活的化学计量特征[J]. 土壤学报，2025，62（3）：811—824.]

[ 22 ] Liu F T，Zhang L S，Li X W，et al. Effects of inter-row planting grasses on soil organic carbon fractions and soil microbial community of apple orchard in Weibei dryland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2014，20（2）：355—363. [刘富庭，张林森，李雪薇，等. 生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2014，20（2）：355—363.]

[ 23 ] Xu Z S，Yang Y M，Chen X J，et al. The effects of microbial fertilizer and mixed-sowing on soil enzyme activities and microbial biomass[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2018（6）：77—83. [徐忠山，杨彦明，陈晓晶，等. 菌肥对混播牧草土壤酶活性及微生物的影响[J]. 中国土壤与肥料，2018（6）：77—83.]

[ 24 ] Shi Y，Luan L，Jiang X Z，et al. Effects of film mulching on soil quality，garlic yield，and garlic quality[J]. Environmental Science，2024，45( 9 )：5464—5473. [师玥，栾璐，蒋希芝，等. 不同地膜覆盖对土壤质量和大蒜产量及品质的影响[J]. 环境科学，2024，45（9）：5464—5473.]

[ 25 ] Ramos M E，Benítez E，García P A，et al. Cover crops under different managements *vs*. frequent tillage in almond orchards in semiarid conditions：Effects on soil quality[J]. Applied Soil Ecology，2010，44（1）：6—14.

[ 26 ] Wang P，Wang Y，Wu Q S. Effects of soil tillage and planting grass on arbuscular mycorrhizal fungal propagules and soil properties in *Citrus* orchards in southeast China[J]. Soil & Tillage Research，2016，155：54—61.

[ 27 ] Tian Y L，Wu X P，Chen X F，et al. Effect of diversity mulching model on soil enzyme activities in the Loess Plateau orchard[J]. Acta Agrestia Sinica，2022，30( 10 )：2581—2589. [田玉莉，吴小苹，陈欣佛，等. 黄土高原果园不同覆盖模式对土壤酶活性的影响[J]. 草地学报，2022，30（10）：2581—2589.]

[ 28 ] Yu P J，Tang X G，Zhang A C，et al. Responses of soil specific enzyme activities to short-term land use conversions in a salt-affected region，northeastern China[J]. Science of the Total Environment，2019，687：939—945.

[ 29 ] Banerjee S，Bora S，Thrall P H，et al. Soil C and N as causal factors of spatial variation in extracellular enzyme activity across grassland-woodland ecotones[J]. Applied Soil Ecology，2016，105：1—8.

[ 30 ] Lü F L，Liang K L，Ji B J，et al. Seasonal regulation of soil microbial carbon and phosphorus metabolisms in an apple orchard：Evidence from the enzymatic stoichiometry method[J]. Environmental Science，2023，44（10）：5788—5799. [吕凤莲，梁凯霖，吉冰洁，等. 基于酶化学计量法探究有机无机肥配施调控果园土壤微生物碳、磷代谢机制[J]. 环境科学，2023，44（10）：5788—5799.]

[ 31 ] Xue Y，Kang H B，Yang H，et al. Extracellular enzyme stoichiometry and microbial metabolism limitation during vegetation restoration process in the middle of the Qinling Mountains，China[J]. Environmental Science，2022，43（1）：550—559. [薛悦，康海斌，杨航，等. 秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征[J]. 环境科学，2022，43（1）：550—559.]

[ 32 ] Yang R Z，Yang Z，Xu L Y，et al. Effects of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers on soil quality，microbial metabolism，and soil ecosystem multifunctionality of spring maize under white plastic film mulching[J]. Environmental Science，2024，45( 11 )：6745—6755. [杨睿哲，杨泽，徐灵颖，等. 白膜覆盖下增效氮肥对春玉米土壤质量、微生物代谢和生态功能多样性的影响[J]. 环境科学，2024，45（11）：6745—6755.]

[ 33 ] Mei L L，Zhang P，Cui G W，et al. Arbuscular mycorrhizal fungi promote litter decomposition and alleviate nutrient limitations of soil microbes under warming and nitrogen application[J]. Applied Soil Ecology，2022，171：104318.

[ 34 ] Tian S Z，Guan X L，Ning T Y，et al. Improvement cultivated land quality by diversified cropping system：Advances and prospects[J]. Acta Pedologica Sinica，2024，61（3）：619—634. [田慎重，管西林，宁堂原，等. 多样化种植对提升耕地质量的作用：进展与展望[J]. 土壤学报，2024，61（3）：619—634.]

[ 35 ] Han Z Q，Xu P S，Li Z T，et al. Microbial diversity and the abundance of keystone species drive the response of soil multifunctionality to organic substitution and biochar amendment in a tea plantation[J]. Global Change Biology Bioenergy，2022，14（4）：481—495.

[ 36 ] Huo R X，Wang J L，Wang K K，et al. Long-term straw return enhanced crop yield by improving ecosystem multifunctionality and soil quality under triple rotation system：An evidence from a 15 years study[J]. Field Crops Research，2024，312：109395.

[ 37 ] Liu Q，Yao W，Zhou J，et al. Winter green manure cultivation benefits soil quality and ecosystem multifunctionality under upland paddy rotations in tropics[J]. Plant and Soil，2025，511（1/2）：395—407.

（**责任编辑**：陈荣府）