

不同经营模式对鲁中坡改梯土壤微生物 碳利用效率的影响

梁如蒙¹, 许婷婷², 张长志¹, 张巧¹, 董智³, 陈新闻³

(1.肥城市水利局, 山东 泰安 271600; 2.肥城市行政审批服务局,
山东 泰安 271600; 3.山东农业大学 林学院/泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018)

摘要: [目的] 解析坡改梯不同经营模式下土壤关键元素化学计量、微生物酶活性及微生物碳利用效率(CUE)的分异特征, 阐明CUE对经营模式的响应机制, 为土石山区梯田优化经营、碳汇提升及提质增效提供理论支撑。[方法] 以山东土石山区坡改梯工程为对象, 系统解析梯田化改造及核桃、樱桃、落花生3种典型经营模式对土壤理化性质、微生物酶活性与CUE的影响机制。[结果] 坡改梯工程较未改造的落花生对照样地, 土壤有机碳增加9.43%~43.96%、全磷增加22.64%~64.15%, 碳磷比及微生物生物量碳、氮含量等指标均显著增加, 其中核桃模式对土壤肥力与碳氮比的优化效果最为显著。不同经营模式主要通过调控凋落物质量改变微生物代谢策略: 核桃模式使 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性提升85.5%, CUE增加12.68%, 并通过缓解微生物碳磷限制使CUE_{C:P}提高19.21%, 显著优于落花生和樱桃模式。结构方程模型表明, 微生物生物量对CUE具有关键正向驱动作用, 微生物生物量化学计量比亦呈显著正效应, 而土壤化学计量失衡通过抑制代谢效率产生负向效应。[结论] 坡改梯工程本身对CUE无直接效应, 需结合适宜植被配置方可实现地形改造与生态功能的协同增效。

关键词: 坡改梯工程; 微生物碳利用效率; 经营模式; 土壤化学计量; 土石山区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0132-07

Effects of different management modes on soil microbial carbon use efficiency in slope-to-terrace conversion systems in central Shandong

Liang Rumeng¹, Xu Tingting², Zhang Changzhi¹, Zhang Qiao¹, Dong Zhi³, Chen Xinchuang³

(1. Feicheng Water Resources Bureau, Tai'an, Shandong 271600, China; 2. Feicheng Administrative Examination and Approval Service Bureau, Tai'an, Shandong 271600, China; 3. College of Forestry, Shandong Agricultural University/Taishan Forest Ecosystem Research Station, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the differentiation characteristics of key soil element stoichiometry, microbial enzyme activities, and microbial carbon use efficiency (CUE) under different management modes following slope-to-terrace conversion and elucidate the response mechanisms of CUE to management modes, thereby providing theoretical support for optimizing terrace management, enhancing carbon sequestration, and improving quality and efficiency in rocky mountainous areas. [Methods] Taking the slope-to-terrace conversion project in the rocky mountainous areas of Shandong as the research subject, this study systematically analyzed the effects and underlying mechanisms of terracing and three typical management modes (walnut, cherry, and peanut) on soil physicochemical properties, microbial enzyme activities, and CUE. [Results] Compared with the unmodified peanut control plot, the slope-to-terrace conversion project increased

收稿日期: 2025-04-07

修回日期: 2025-08-11

接受日期: 2025-08-30

资助项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QC210, ZR2023QD156); 山东省高校优秀青年创新团队(2024KJG043)。

第一作者: 梁如蒙(1988—), 男, 山东省泰安人, 高级工程师, 学士, 主要从事水土保持与流域治理。E-mail: lrm7800@163.com

通信作者: 陈新闻(1992—), 男, 山东省菏泽人, 副教授, 博士, 主要从事区域生态评价与修复。E-mail: xinchuang_chen@sdau.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

soil organic carbon by 9.43%~43.96% and total phosphorus by 22.64%~64.15%. The C:P ratio and microbial biomass carbon and nitrogen contents were all significantly increased. Among these, the walnut mode showed the most significant improvement in soil fertility and C:N ratio. Different management modes primarily altered microbial metabolic strategies by regulating litter quality: the walnut mode resulted in an 85.5% increase in β -N-acetylglucosaminidase activity, a 12.68% increase in CUE, and a 19.21% increase in CUE_{C,P} by alleviating microbial carbon and phosphorus limitation, significantly outperforming the peanut and cherry modes. Structural equation modeling showed that microbial biomass exerted a key positive driving effect on CUE, and the stoichiometric ratios of microbial biomass also showed a significant positive effect, while soil stoichiometric imbalance negatively affected CUE by suppressing metabolic efficiency. **[Conclusion]** The slope-to-terrace conversion project itself has no direct effect on CUE, and it must be combined with appropriate vegetation configuration to achieve synergistic enhancement of terrain modification and ecological functions.

Keywords: slope-to-terrace conversion project; microbial carbon use efficiency; management modes; soil stoichiometry; rocky mountainous area

坡耕地,尤其是土石山区的坡耕地,因地形复杂、水土流失严重、土壤贫瘠及生态环境脆弱等特征,已成为制约农业可持续发展和区域生态安全的关键因素^[1]。近年来,坡耕地梯田化改造凭借其在水土保持、土壤改良及农业生产效率提升等综合效益,成为坡耕地治理的关键措施^[2]。梯田通过地形改造形成水平或近水平台地,可有效减缓地表径流速度、降低水土流失风险,同时通过客土或者深翻技术改善土壤结构与土壤碳氮磷等关键元素赋存状态^[3-4]。然而,梯田经营维护中不同的经营模式与耕作水平可能对土壤肥力产生双重影响^[5-8],其作用差异可能与微生物活性及土壤微生物对碳氮磷元素的利用效率密切相关^[9-10]。

微生物碳利用效率(Carbon Use Efficiency, CUE)作为衡量有机碳向生物量转化的核心指标,其提升可减少碳释放,增强土壤碳库稳定性^[11]。不同利用方式通过改变土壤-植被-微生物系统特征显著影响CUE,如荒漠草原长期放牧导致养分计量失衡抑制CUE^[12],不同混交模式与林龄下的马尾松林地可通过缓解微生物碳磷限制提升CUE^[13],温湿度变化亦会引起CUE显著波动^[14]。梯田建设与经营模式通过地形改造和水管理改善水文循环,并经由多样化耕作方式及外源物质输入,显著影响微生物群落结构、多样性及功能,进而调控CUE,促进土壤碳汇积累与养分循环^[15-16]。Qiu等^[2]研究发现梯田建设可提升细菌和真菌多样性,促使微生物群落由贫营养型向与土壤性质密切相关的共营养型转变;Li等^[16]研究发现在湖南梯田种植苹果而不是传统作物显著提高了微生物生物量和酶活性的可用性。北方旱作梯田及果园经营模式的研究进一步印证了该机制,耿其明等^[17]对比太行山梯田发现,坡改梯后经营为果

园的土壤碳库管理指数较耕地显著提高31.2%,且有机碳组分含量更高,表明果园模式更利于碳汇提升;张骄阳等^[18]在黄土丘陵区的研究也表明,梯田土壤的碳库活度显著高于坡耕地,反映了其碳周转活性与固存潜力的协同增强。Shi等^[19]通过黄土高原梯田研究发现未坡改梯的耕地、林地和草地土壤有机碳含量均为相应坡改梯的一半,且有植被覆盖的梯田有机碳储量较高。可见,土地利用类型、经营方式及植被特征共同驱动CUE动态变化,但相关驱动机制由于区域地理环境的差异、梯田经营模式的差异仍存在较大的不确定性。

在土壤贫瘠的土石山区,由于土壤的疏松结构和资源匮乏导致微生物群落组成单一、CUE偏低。梯田化改造通过改变土层结构与经营模式,可能重塑CUE特征。然而,不同经营模式下土石山区土壤碳、氮、磷元素有效性差异及其对CUE的影响机制尚未明晰,梯田化后经营模式差异如何通过调控微生物过程影响碳汇积累仍需深入探究。基于此,本研究以山东泰沂山区典型土石山区坡改梯工程为对象,聚焦土壤有机碳、氮、磷养分及酶活性等指标,解析不同经营模式下土壤关键元素特征、酶活性及CUE的分异特征,阐明CUE对经营模式的响应机制,为土石山区梯田优化经营、碳汇提升及提质增效提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省肥城市张花峪村(116°48'44.15"E,36°17'28.27"N),属于鲁中南低山丘陵区花岗岩山地,土壤类别主要为棕壤。原始坡耕地以种植落花生(*Arachis hypogaea*)、玉米(*Zea mays*)为主,长期水土流失使土层浅薄、土壤多砂砾化,土

层深度8~23 cm,坡度为5°~8°。该区域于2021年完成坡改梯工程,梯田为土坎梯田,田面宽度15~22 m,田坎顶部设置蓄水埂,田面内侧设置横向排水沟,调查期间主要经营模式为核桃(*Carya cathayensis*)、樱桃(*Prunus pseudocerasus*)和连作落花生。研究区属于暖温带大陆性季风气候,多年平均降雨量649.7 mm,年平均风速2.3 m/s,夏季降雨侵蚀较强,水土流失为轻度侵蚀,天然植被呈间断分布,表现为半干旱的植被群落特征,主要以黄背草(*Themeda japonica*)为优势种。

1.2 样地布设与样品采集

2024年10月,于多日连续晴朗的天气选取经营3 a的坡改梯核桃林地(THT)、坡改梯樱桃园地(TYT)、坡改梯连作落花生耕地(THS),并以未实施坡改梯区域的连作落花生耕地作为对照组(CK),均按照各自经营模式正常管理施肥。各经营模式均于坡中开阔位置选择3处样地,以每个样地中心点为基础,向四周按照“S”形布设取样点,每点位布设1 m×1 m样方。采集地表凋落物后期烘干称重测量凋落物量,环刀取土后期测定土壤容重,按照五点取样法采集0—20 cm土层土壤,混合均匀后去除石砾和根系,过2 mm筛并分装为两份:一份于4℃保存,用于测定土壤酶活性及微生物生物量;另一份自然风干后测定pH、有机碳、全氮和全磷含量。

1.3 指标测定

土壤理化性质:土壤pH值采用电位法测定;有机碳、全氮采用碳氮元素分析仪测定;全磷经H₂SO₄-HClO₄消解后,通过钼锑抗比色法结合紫外—可见分光光度法测定。

微生物生物量:土壤微生物生物量碳和微生物生物量氮采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法^[20];土壤微生物生物量磷使用氯仿熏蒸-NaHCO₃浸提法,使用分光光度计测定^[21]。

土壤酶活性:使用微孔板荧光计(I3X, Molecular Devices, 美国)荧光法检测β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)、β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、纤维二糖水解酶(CBH)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)及酸性磷酸酶(ACP)活性^[22]。

1.4 CUE计算

基于生物地球化学循环平衡模型评估CUE^[13],公式如下:

$$CUE = CUE_{\max} \times \left\{ (S_{C:N} \times S_{C:P}) \left[(K_{C:N} + S_{C:N}) \times (K_{C:P} + S_{C:P}) \right] \right\}^{0.5} \quad (1)$$

$$S_{C:N} = (1/EEA_{C:N}) \times (MB_{C:N}/L_{C:N}) \quad (2)$$

$$S_{C:P} = (1/EEA_{C:P}) \times (MB_{C:P}/L_{C:P}) \quad (3)$$

$$EEA_{C:N} = (BG + CBH)/(NAG + LAP) \quad (4)$$

$$EEA_{C:P} = (BG + CBH)/ACP \quad (5)$$

式中:K_{C:N}和K_{C:P}为CUE半饱和常数,取值0.5,CUE_{MAX}为微生物的最大值,取值0.6^[23];EEA_{C:N}和EEA_{C:P}为碳氮酶和碳磷酶活性的比值;L_{C:N}和L_{C:P}为土壤可利用碳氮、碳磷比值。

1.5 数据处理

采用方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)结合LSD法(α=0.05)进行差异显著性检验,利用Origin 2024软件作图。利用R 4.4.3软件构建偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM, plsmpm包),解析关键因子对CUE的调控路径。

2 结果与分析

2.1 不同经营模式对土壤理化性质及微生物养分特征的影响

坡改梯措施与不同经营模式的协同作用显著改变了土壤理化性质(表1)。坡改梯各模式下pH值均显著低于CK($p < 0.05$)。THT与TYT模式容重低于CK,THS模式容重高于CK,但无显著差异($p > 0.05$)。坡改梯模式整体上提升了土壤养分特征,其中有机碳、全氮、全磷、微生物生物量碳和微生物生物量氮含量均显著高于CK($p < 0.05$)。坡改梯模式下,THT有机碳、全氮、微生物生物量碳及微生物生物量氮含量最高,落花生次之,樱桃最低。全磷与微生物生物量磷含量同样以THT最高,但THS与TYT模式间无显著差异($p > 0.05$)。通过分析土壤化学计量比,发现THT的碳氮比显著低于其他模式,而THS与TYT的碳氮比仅略高于CK($p > 0.05$)。坡改梯模式下碳磷比均显著低于CK($p < 0.05$),而氮磷比则以TYT地最低($p < 0.05$)。微生物生物量对经营模式的响应更为敏感。THT的微生物生物量碳、氮和磷均显著高于其余模式($p < 0.05$),除微生物生物量磷外,THS的微生物生物量碳和微生物生物量氮均显著高于CK,较CK分别增加47.4%,20.2%($p < 0.05$)。坡改梯模式下微生物量碳氮比和微生物量碳磷比均显著高于CK($p < 0.05$),不同经营模式下为THT最高,与THS无显著差异,显著高于TYT($p < 0.05$)。值得注意的是,TYT的微生物量氮磷比与CK相比无显著差异($p > 0.05$)。

2.2 不同经营模式下土壤微生物酶活性及碳利用效率

坡改梯措施与经营模式显著影响土壤微生物酶活性(图1)。坡改梯田后显著提高微生物酶活性及

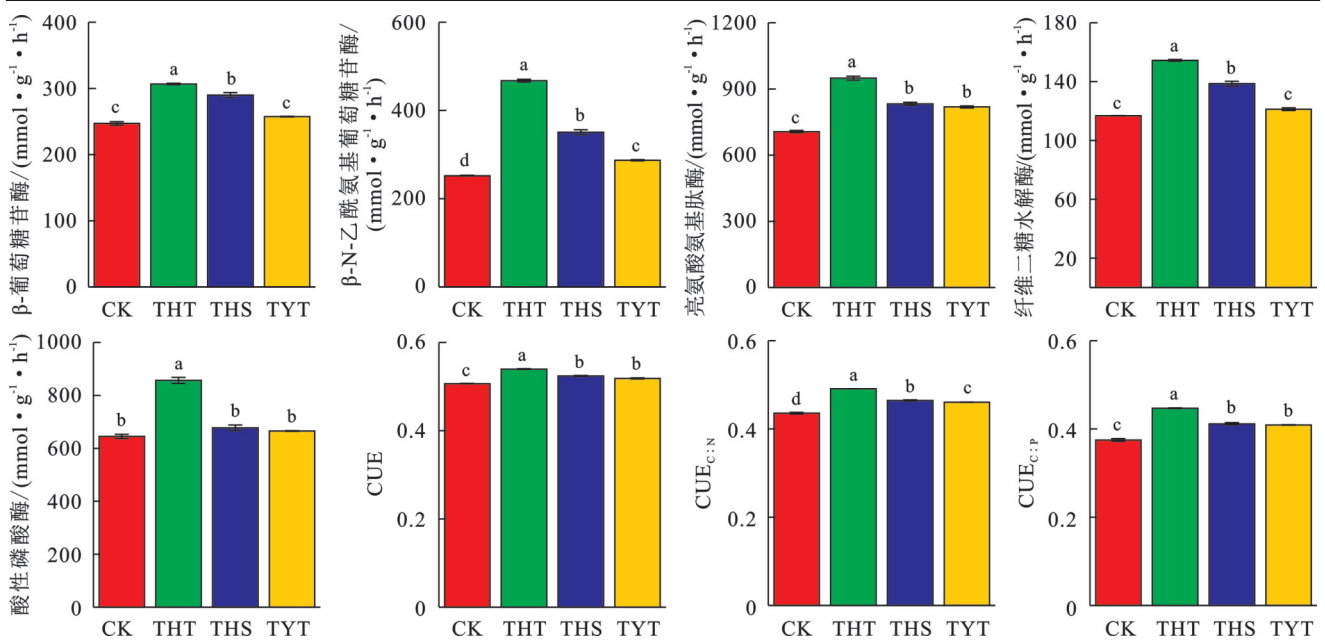
CUE($p < 0.05$),但不同经营模式下具有差异性。BG, NAG, LAP, CBH和ACP活性在不同处理间存在显著差异($p < 0.05$),THT模式在关键碳氮循环酶活性上表现出较高水平。与CK相比,THT的BG, NAG, LAP, CBH和ACP活性分别显著增加24.1%,85.5%,34.3%,32.2%和32.8%。THS的BG, NAG, LAP和CBH活性显著高于CK($p < 0.05$),ACP活性与CK无显著差异($p > 0.05$)。TYT的NAG, LAP活性显著高于CK($p < 0.05$),BG, CBH, ACP活性与CK无显

著差异($p > 0.05$)。与CK相比,THT, THS和TYT的CUE分别显著提高了12.7%,6.6%,5.7%($p < 0.05$)。THT的CUE显著高于THS和TYT($p < 0.05$),而THS与TYT间无显著差异($p > 0.05$)。THT的CUE_{C:N}和CUE_{C:P}均显著高于THS和TYT($p < 0.05$),但CUE_{C:P}增幅最为明显,THT较CK提升19.2%,与THS相比增幅为8.6%,与TYT相比增幅为9.2%。THS与TYT间CUE_{C:N}具有显著差异($p < 0.05$),THS与TYT间CUE_{C:P}无显著差异($p > 0.05$)。

表1 不同经营模式下土壤理化性质及微生物养分特征

Table 1 Soil physicochemical properties and microbial nutrient characteristics under different management modes

土壤理化指标	未坡改梯落花生	坡改梯核桃	坡改梯落花生	坡改梯樱桃
pH	6.76±0.13a	6.61±0.06b	6.43±0.04bc	6.27±0.06bc
容重/(g·cm ⁻³)	1.51±0.05ab	1.36±0.03bc	1.64±0.03a	1.20±0.05c
有机碳/(g·kg ⁻¹)	14.74±0.40d	21.22±0.26a	17.33±0.12b	16.13±0.16c
全氮/(g·kg ⁻¹)	2.10±0.05c	3.34±0.04a	2.44±0.03b	2.21±0.04c
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.53±0.03c	0.87±0.02a	0.65±0.01b	0.64±0.03b
碳氮比	7.04±0.06a	6.35±0.05b	7.10±0.03a	7.29±0.03a
碳磷比	27.83±0.35a	24.30±0.16d	26.50±0.06b	25.36±0.16c
氮磷比	3.96±0.05a	3.82±0.01a	3.73±0.07a	3.48±0.04b
微生物生物量碳/(mg·kg ⁻¹)	216.73±1.51d	380.21±7.70a	319.45±3.27b	264.45±1.09c
微生物生物量氮/(mg·kg ⁻¹)	29.98±0.30d	41.27±0.92a	36.03±0.43b	33.33±0.45c
微生物生物量磷/(mg·kg ⁻¹)	16.59±0.34b	19.92±0.47a	17.46±0.23b	17.10±0.02b
微生物生物量碳氮比	7.23±0.04c	9.22±0.12a	8.87±0.03a	7.94±0.08b
微生物生物量碳磷比	13.08±0.33c	19.09±0.24a	18.30±0.07a	15.47±0.04b
微生物生物量氮磷比	1.81±0.04b	2.07±0.05a	2.06±0.00a	1.95±0.02ab



注:CK表示未坡改梯落花生对照组;THT表示坡改梯核桃;THS表示坡改梯落花生;TYT表示坡改梯樱桃;CUE表示微生物碳利用效率;CUE_{C:N}表示微生物碳氮利用效率;CUE_{C:P}表示微生物碳磷利用效率;小写字母表示不同处理差异显著($p < 0.05$)。

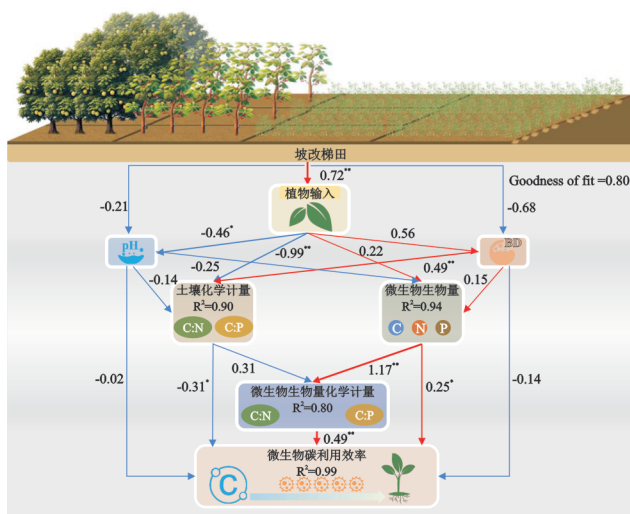
图1 不同经营模式下微生物酶活性与碳利用效率

Fig. 1 Microbial enzyme activities and carbon use efficiency under different management modes

2.3 不同经营模式下碳利用效率的影响因素

基于 PLS-SEM 模型,所有预测变量对 CUE 变化的解释力较强 ($GOF=0.8$),表征所有预测变量共同解释了 CUE 的变化特征(图 2)。微生物生物量化学计量比、微生物生物量、土壤化学计量比对 CUE 具有直接驱动作用,土壤微生物量在 CUE 中起着核心的积极作用,总效应为 $0.81(p<0.05)$ 。其中直接效应贡献 24.58% (路径系数 $=0.25$),另通过调控微生物生物量化学计量比产生 56.75% 的间接效应。这表明高微生物生物量不仅直接增强碳同化能力,还通过优化细胞元素平衡提升代谢效率。土壤化学计量比对 CUE 呈现显著抑制效应(总效应为 $-0.65, p<0.05$),

通过降低微生物生物量(路径系数 $=-0.61$)产生间接负效应,也通过高碳氮比加剧氮限制,迫使微生物分配更多资源于分解代谢而非生长。坡改梯核桃处理凭借较低的碳氮比和较高的全氮含量,有效缓解了化学计量抑制效应。微生物生物量化学计量比在 CUE 中起着积极作用($p<0.01$),总效应为 0.49 。相比之下,不同经营模式通过凋落物输入质量差异间接调控 CUE,坡改梯工程本身对 CUE 无直接效应,表明地形改造需与适宜植被配置结合才能发挥协同增效。土壤 pH 与容重虽受植被输入影响,但其对 CUE 的直接调控路径未达显著水平($p>0.05$)。



注: Treat 为坡改梯工程; Input 为植物输入; BD 为土壤容重; Soil 为土壤化学计量; MB 为微生物量; MBCNP 为微生物生物量化学计量; *, $p<0.05$; **, $p<0.01$ 。

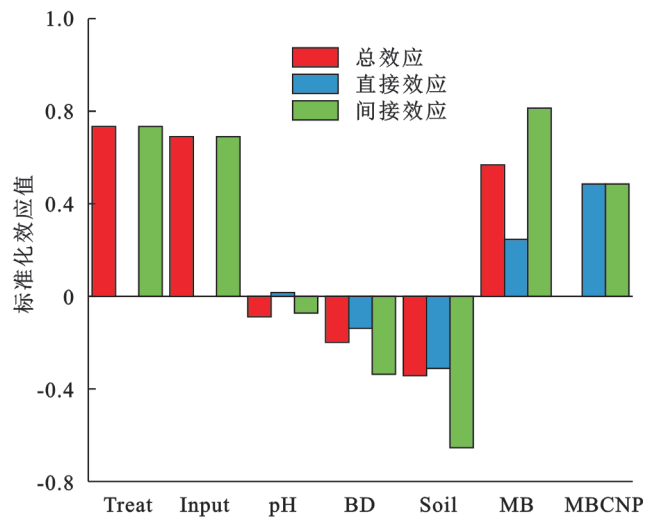


图 2 不同经营模式下微生物碳利用效率的影响机制与影响效应

Fig. 2 Mechanisms and effects of microbial carbon use efficiency under different management modes

3 讨论

本研究揭示了坡改梯工程显著提升了土壤有机碳、全氮、全磷及微生物生物量碳氮含量,这与梯田建设对水土流失的遏制、土壤结构的改善和促进凋落物原位积累密切相关。通过梯田建设,使土壤流失大幅度降低,且随着植物凋落物输入和根系的不断改良,土壤肥力特征不断增强^[7]。经营管理方式的不同,进一步通过对土层结构、水文循环以及凋落物的改变影响土壤肥力特征和微生物特征^[24]。本研究中核桃林经营模式在土壤养分特征提升方面表现最优,其有机碳、全氮及微生物生物量碳氮含量均显著高于其他模式,这可能与核桃深根系促进深层养分吸收及凋落物输入质量较高有关,且核桃凋落物丰富的木质素和酚类物质有利于有机质积累^[25]。核桃根系促进深层钙镁离子上移,通过阳离子交换缓冲土壤酸化,同时木质素含量高的凋落物输入,促进真菌主导的腐殖化

过程,使有机碳积累效率较樱桃模式提高 31.6% ,这一发现与温带森林生态系统中木质素影响碳封存的研究结论一致^[26]。同时,核桃林土壤碳氮比的显著降低表明其有机质矿化速率较高,有利于养分周转效率的提升,这与微生物群落由贫营养型向共营养型转变的研究一致^[2]。但仍需注意的是,在樱桃模式下微生物量氮磷比显著降低、 $CUE_{C:P}$ 增幅最小,进一步通过计算 C:P 酶化学计量比,樱桃模式下显著高于核桃模式和对照模式,表明樱桃模式可能存在潜在的磷限制压力,这一多指标协同响应的模式与松栎混交林中叶凋落物输入缓解磷限制的机制相似^[27]。核桃模式下则通过较高的土壤全磷含量提供充足磷源及 NAG 活性激增促进有机磷矿化,优化了微生物的磷获取策略,使其 $CUE_{C:P}$ 显著提升。

不同经营模式对微生物酶活性及 CUE 的调控呈现梯度差异。核桃模式在 NAG 酶活性及 CUE 提升方面均显著优于其他模式,其 CUE 增幅达 12.7% (与

CK相比),且 $CUE_{C:P}$ 提升尤为显著(19.2%)。这种差异可能源于核桃林凋落物输入改善了微生物碳磷限制,从而优化其代谢策略以提高碳固存效率^[13]。微生物生物量的增加直接强化了碳同化能力,这与全球尺度上微生物量增长对CUE的正向效应机制一致^[28]。与之相比,樱桃模式较低的CUE增幅(5.7%)可能与其浅根系植被的凋落物质量及养分竞争效应相关,凋落物质量差异通过改变底物可利用性间接调控CUE的现象在黄土高原刺槐人工林研究中也证实^[29]。坡改梯落花生 $CUE_{C:P}$ 虽高于CK,但仍显著低于核桃林,说明豆科作物连作虽增加氮输入,却加剧微生物磷饥饿应激(微生物量磷降低14.8%)。BG和LAP酶活性在樱桃模式中未表现出显著提升,表征不同酶系统对经营模式的响应存在特异性,这可能与底物可利用性及微生物功能群落的组成差异有关^[11]。结构方程模型进一步阐明了CUE的驱动机制。微生物生物量对CUE的直接正向效应凸显了微生物量增长在碳固存中的核心作用,这与微生物量增加可强化资源竞争、降低呼吸损耗的假说相符^[9]。土壤化学计量比对CUE的负向效应则表明,当土壤碳氮磷比例失衡时,微生物需投入更多能量进行养分获取,导致代谢效率下降^[12]。

值得注意的是,经营模式通过凋落物输入间接调控CUE的路径,验证了植被类型通过改变底物质量影响微生物代谢策略的理论框架^[13],即高质量凋落物通过降低C:N促进分解产物向微生物生物量转化。但pH与容重等物理因子未表现出显著影响,当pH在6.0~6.7范围内波动时,微生物通过调整膜透性与酶构象维持代谢稳态,削弱了pH对CUE的直接影响,这与温带混交林pH对酶化学计量影响的主导性形成对比^[27]。

4 结论

梯田化改造可显著提升土壤肥力,增强微生物酶活性及碳汇能力,但不同经营模式的效应存在显著差异。核桃模式通过深根系养分吸收与高质量凋落物输入,协同提升土壤有机碳积累及微生物生物量,并增强NAG酶活性促进有机磷矿化,显著优化微生物磷获取策略,使其 $CUE_{C:P}$ 提升19.2%,CUE增幅达12.7%,综合表现最优。樱桃模式因浅根系限制与凋落物质量劣势,导致微生物量氮磷比显著降低、 $CUE_{C:P}$ 增幅最小,结合其低土壤氮磷比,表明该模式存在持续磷限制压力,最终CUE增幅仅5.7%。坡改梯落花生模式虽通过豆科固氮提升 $CUE_{C:N}$,但其微生物量磷增幅有限且 $CUE_{C:P}$ 显著低于核桃模

式,反映豆科连作未能缓解磷饥饿状态。微生物生物量对CUE具有核心正向驱动作用,而土壤化学计量失衡通过抑制微生物代谢效率产生负向效应,提升微生物生物量并同步调控碳磷元素平衡是增强碳汇的关键路径。经营模式通过凋落物输入间接调控CUE的机制,为梯田管理提供了理论依据。

参考文献(References):

- [1] Li M N, Li X L, Shi Y L, et al. Soil enzyme activity mediated organic carbon mineralization due to soil erosion in long gentle sloping farmland in the black soil region[J]. *Science of the Total Environment*, 2024,929:172417.
- [2] Qiu Y B, Fu Q, Yang Y H, et al. Soil and stone terraces offset the negative impacts of sloping cultivation on soil microbial diversity and functioning by protecting soil carbon[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 369:122339.
- [3] Wei W, Chen D, Wang L X, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016,159:388-403.
- [4] Chen D, Wei W, Chen L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta-analysis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017,173:109-121.
- [5] Ramos M C, Cots-Folch R, Martínez-Casasnovas J A. Effects of land terracing on soil properties in the Priorat region in Northeastern Spain: a multivariate analysis[J]. *Geoderma*, 2007,142(3/4):251-261.
- [6] 蔡进军,李生宝,蒋齐,等.宁南黄土丘陵区典型水保工程措施对土壤入渗性能的影响[J].*水土保持通报*, 2010,30(1):22-26.
Cai J J, Li S B, Jiang Q, et al. Effects of typical soil and water conservation project on infiltration capacity in Loess Hilly Regions of southern Ningxia Hui autonomous region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010,30(1):22-26.
- [7] Chen D, Wei W, Daryanto S, et al. Does terracing enhance soil organic carbon sequestration: a national-scale data analysis in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,721:137751.
- [8] Abbas F, Hammad H M, Ishaq W, et al. A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 268: 110319.
- [9] 李荣,宋维峰.哈尼梯田生态系统土壤微生物量碳的影响因素[J].*生态学报*,2020,40(17):6223-6232.
Li R, Song W F. Factors affecting soil microbial biomass carbon in Hani terraced ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(17):6223-6232.
- [10] 胡斯乐,董立国,白晓雄,等.黄土丘陵区典型土地利用类型土壤-微生物量及其生态化学计量特征[J].*水土保持学报*,2024,38(3):298-305.
Hu S L, Dong L G, Bai X X, et al. Soil microbial bio-

- mass and ecological stoichiometric characteristics of typical land use types in Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(3):298-305.
- [11] Shi J W, Deng L, Wu J Z, et al. Soil organic carbon increases with decreasing microbial carbon use efficiency during vegetation restoration[J]. Global Change Biology, 2024,30(12):e17616.
- [12] 吴佳芯,李邵宇,韩国栋.不同放牧强度下荒漠草原土壤化学计量失衡与微生物碳利用效率的联系[J].应用生态学报,2024,35(8):2108-2118.
Wu J X, Li S Y, Han G D. Linkage between soil stoichiometric imbalance and microbial carbon use efficiency in desert steppe under different grazing intensities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(8): 2108-2118.
- [13] 王曼,姜永孟,张世良,等.树种混交对侵蚀退化地马尾松林土壤酶活性和碳利用效率的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):264-272.
Wang M, Jiang Y M, Zhang S L, et al. Effects of mixing tree species on soil enzyme activity and carbon-use efficiency in eroded Masson pine forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(6):264-272.
- [14] 段露露,乔芷瑛,袁艳红,等.黄土高原刺槐林土壤化学计量特征和微生物元素利用效率的季节差异[J].生态学报,2024,44(15):6584-6596.
Duan L L, Qiao Z Y, Yuan Y H, et al. Seasonal differences of soil stoichiometric characteristics and microbial element utilization efficiency in *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(15):6584-6596.
- [15] Xiao L, Huang Y M, Zhao J F, et al. Effects of planting structure on soil water-stable aggregates, microbial biomass and enzyme activity in a catchment of Loess Plateau terraces, China [J]. Applied Soil Ecology, 2021,159:103819.
- [16] Li W Q, Liu Y J, Guo Z R, et al. Impacts of rice terrace abandonment on soil ecosystem multifunctionality: Insights into reduced microbial diversity and exacerbated nitrogen limitation[J]. Journal of Cleaner Production, 2024,437:140731.
- [17] 耿其明,王洋,闫丰,等.基于坡改梯工程后的园地和耕地土壤碳库及其组分演变特征[J].河北农业大学学报,2020,43(1):62-68.
Geng Q M, Wang Y, Yan F, et al. Evolution of soil organic carbon pool and its fractions of orchard or cultivated land after slope-to-terrace project[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2020,43(1):62-68.
- [18] 张娇阳,梁楚涛,董昌平,等.黄土丘陵区不同土地利用下土壤碳组分及碳库管理指数特征[J].水土保持研究,2016,23(4):66-69,76.
Zhang J Y, Liang C T, Dong C P, et al. Characteristics of soil carbon components and carbon pool management indices in different land uses in Loess Hilly Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(4):66-69,76.
- [19] Shi Y, Wei W. Terracing drives Chinese Loess Plateau toward carbon neutrality: spatiotemporal interaction between land use transitions and SOC storage[J]. Journal of Environmental Management, 2025,385:125760.
- [20] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987,19(6):703-707.
- [21] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982,14(4):319-329.
- [22] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002,34(9):1309-1315.
- [23] Sinsabaugh R L, Manzoni S, Moorhead D L, et al. Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling [J]. Ecology Letters, 2013,16(7):930-939.
- [24] Yang Y, Zhang Y E, Yu X X, et al. Soil microorganism regulated aggregate stability and rill erosion resistance under different land uses[J]. Catena, 2023, 228: 107176.
- [25] Lu S, Meng P, Zhang J S, et al. Changes in soil organic carbon and total nitrogen in croplands converted to walnut-based agroforestry systems and orchards in southeastern Loess Plateau of China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015,187(11):688.
- [26] Feng X J, Simpson A J, Wilson K P, et al. Increased cuticular carbon sequestration and lignin oxidation in response to soil warming[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(12):836-839.
- [27] 栾历历,刘恩媛,顾新,等.凋落物处理和氮添加对松栎混交林土壤生态酶化学计量的影响[J].生态学报, 2020,40(24):9220-9233.
Luan L L, Liu E Y, Gu X, et al. Effects of litter manipulation and nitrogen addition on soil coenzymatic stoichiometry in a mixed pine and oak forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(24):9220-9233.
- [28] Hu J X, Huang C D, Zhou S X, et al. Nitrogen addition to soil affects microbial carbon use efficiency: meta-analysis of similarities and differences in ¹³C and ¹⁸O approaches[J]. Global Change Biology, 2022,28(16): 4977-4988.
- [29] Zeng J, Li X Y, Song R, et al. Mechanisms of litter input changes on soil organic carbon dynamics: a microbial carbon use efficiency-based perspective[J]. Science of the Total Environment, 2024,949:175092.