

长期施肥对核桃园土壤团聚体结构及其理化和生物学特性的影响

孙琳娜^{1,2}, 郝苑汝¹, 钱保如², 汪悦², 施景文², 翟梅枝¹

(1.西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; 2.骆运水利工程管理处, 江苏宿迁 223800)

摘要: [目的] 探究长期施肥对核桃园土壤团聚体粒径分布、理化性质及微生物特性的综合影响, 阐明其调控机制, 为科学施肥提供理论与实践支持。[方法] 以‘香玲’核桃为研究对象。5种施肥处理:(1)不施肥(CK)、(2)单施化肥(T₁)、(3)化肥与有机肥配施(T₂)、(4)化肥与生物菌肥配施(T₃)、(5)化肥、有机肥及生物菌肥联合施用(T₄)。结合干湿筛法细化团聚体粒径, 系统分析了核桃园土壤团聚体结构稳定性、养分分布及微生物活性。[结果] 长期施肥显著提升土壤团聚体的稳定性与功能性, T₄处理综合效果最佳, 显著提高中小粒径团聚体(1~0.25 mm)比例, 改善pH与含水率, 增强微生物活性及酶促代谢潜力。团聚体粒径影响微生物富集与酶活性分布, 中小粒径团聚体在养分保持与功能酶表达方面表现出更强的生态优势。T₁处理虽微生物活性提升有限, 但SMBN/TN比值较高, 表明其对氮素转化存在调节效应。[结论] 化肥、有机肥与菌肥协同施用可通过优化团聚体结构、激活碳氮相关酶活性, 构建高效稳定的养分循环系统, 显著提升土壤生态功能与生产潜力, 是实现核桃园高产优质和土壤可持续管理的关键途径。

关键词: 配施肥; 核桃; 土壤团聚体质量

中图分类号:S664.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2026)02-0215-09

Effect of long-term fertilization on structure, physicochemical, and biological properties of soil aggregates in walnut orchards

Sun Linna^{1,2}, Hao Yuanru¹, Qian Baoru², Wang Yue², Shi Jingwen², Zhai Meizhi¹

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.Luoyun Water Conservancy Engineering Management Office, Suqian, Jiangsu 223800, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the comprehensive effect of long-term fertilization on soil aggregate size distribution, physicochemical properties, and microbial characteristics in walnut orchards and clarifies its regulatory mechanisms, aiming to provide theoretical and practical support for scientific fertilization. [Methods] The walnut (*Juglans regia* L.) cultivar ‘Xiangling’ was selected as the research object. Five fertilization treatments were applied: (1) no fertilization (CK), (2) chemical fertilizer alone (T₁), (3) combined application of chemical and organic fertilizers (T₂), (4) combined application of chemical and bacterial biofertilizers (T₃), and (5) combined application of chemical, organic, and bacterial biofertilizers (T₄). Soil aggregate sizes were refined using the dry-wet sieving method, and soil aggregate structural stability, nutrient distribution, and microbial activity were systematically evaluated. [Results] Long-term fertilization significantly improved the stability and functionality of soil aggregates. The T₄ treatment showed the optimal comprehensive effectiveness, significantly increasing the proportion of small- and medium-sized aggregates (1~0.25 mm),

收稿日期:2025-04-30

修回日期:2025-05-18

接受日期:2025-05-22

资助项目:国家重点研发计划“逆境对油料树种品质与产量形成的影响机制”(2023YFD2200305);陕西省重点研发计划“核桃种质资源保护利用及轻简化栽培关键技术研发及产业化”(2023-ZDLNY-18)

第一作者:孙琳娜(1997—),女,江苏徐州人,硕士,主要从事核桃园营养与肥料研究。E-mail:sun19981017@yeah.net

通信作者:翟梅枝(1973—),女,河南西平人,博士,教授,主要从事核桃良种选育、高效栽培。E-mail:plum-zhai@163.com

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

improving soil pH and moisture content, and enhancing microbial activity and enzymatic metabolic potential. Aggregate size affected microbial enrichment and enzyme activity distribution, with small and medium-sized aggregates demonstrating stronger ecological advantages in nutrient retention and functional enzyme expression. Although the T_1 treatment showed limited improvement in microbial activity, its higher soil microbial biomass nitrogen to total nitrogen (SMBN/TN) ratio indicated a regulatory effect on nitrogen transformation. [Conclusion] The combined application of chemical, organic, and bacterial biofertilizers can optimize aggregate structure and activate carbon- and nitrogen-related enzyme activities, thereby establishing an efficient and stable nutrient cycling system. This significantly enhances soil ecological functions and production potential, making it a key approach for achieving high yield and high quality in walnut orchards while promoting sustainable soil management.

Keywords: combined fertilization; walnut; soil aggregate mass

核桃(*Juglans regia* L.)是我国重要的经济林木树种之一。2005年以来产业快速发展,呈现良好的增长势头^[1]。截至2020年,中国核桃种植面积位居全球首位,年产量达479.59万t,居世界第一。2020年陕西核桃产量占全国总产量的9.3%,位列全国第四^[2]。核桃的生长发育、产量形成及果实品质在很大程度上依赖于土壤生态系统的健康状态^[3]。但我国多数核桃园存在化肥与农药使用过量、有机肥投入不足等不合理肥药施用行为,导致土壤板结、酸化、团聚结构破坏、养分流失加剧和地力下降,严重制约了核桃产业的可持续发展^[4]。

肥料投入是果园系统中调控土壤养分平衡的核心手段。合理施肥不仅能够提升土壤酶活性,增强微生物功能群落多样性,也是影响果实品质与产量的关键因素之一^[5]。实际生产中不合理施肥行为不仅制约核桃树正常生长,对生态环境造成较大负担^[6]。研究已证实,长期施肥对土壤团聚体稳定性及养分空间分布具有深远影响^[7]。尤其是化肥与有机肥、生物菌肥的配施,不仅能够提升土壤团聚体的结构稳定性与有机质含量,还可改善团聚体内部微环境,促进有机质的积累与稳定存在,提高土壤抗侵蚀能力及微生态系统活性^[8]。

土壤团聚体是由土粒在有机质、黏土及微生物代谢产物等胶结因子的作用下结合而成的土壤基本结构单元,被视为土壤养分和有机质的主要贮藏载体^[9]。并规定粒径 >0.25 mm的团聚体为大团聚体,粒径 <0.25 mm的团聚体为微团聚体^[10]。大团聚体可细分为 >5 mm, $2\sim5$ mm和 $0.25\sim2$ mm;微团聚体可细分为 $0.053\sim0.25$ mm和 <0.053 mm。团聚体的数量和稳定性直接影响土壤结构、抗蚀能力、养分保持、水分调控及碳循环等多项土壤生态功能^[11]。研究表明,团聚体的形成与稳定性受土壤有机质含量、微生物活性及外源养分输入方式的共同调控,科学施肥可有效促进团聚体稳定性提升,从而改善土壤质

量^[12]。因此,探索适宜的施肥策略,提升土壤团聚体质量与肥力水平,构建高效、可持续的土壤养分管理体系,已成为当前农林产业持续发展的关键课题。

本研究以‘香玲’核桃为试验对象,基于长期施肥定位试验,在团聚体分类基础上,做了更细致的划分,干筛处理增加了 $2\sim1$ mm和 $1\sim0.25$ mm,湿筛处理增加了 $1\sim0.5$ mm和 $0.5\sim0.25$ mm,系统分析不同施肥模式对土壤团聚体组成、养分分布与稳定性、微生物学特性的影响,旨在揭示科学施肥对核桃园土壤团聚体功能优化和肥力提升的机制,为核桃园合理施肥管理提供理论支持和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西省商洛市山阳县西北农林科技大学核桃试验示范站($109^{\circ}56$ E, $35^{\circ}21$ N),秦岭东南侧,气候湿润,四季分明,平均海拔838 m,年平均气温 13°C ,年平均降水量709 mm。试验地为砂质壤土(砂粒、粉粒和黏粒分别为62.07%, 30.19%, 7.74%)。土壤肥力中等偏下。开展长期施肥试验前,土壤中全氮(TN)8.66 mg/kg,速效磷(AP)29.06 mg/kg,速效钾(AK)98.82 mg/kg,有机质(Soil Organic Matter, SOM)10.34 g/kg, $\text{pH}=7.25$ 。

1.2 供试材料与试验设计

供试材料:‘香玲’核桃,种植密度为 $5\text{ m}\times6\text{ m}$, 330株/ hm^2 。南北定植,树势均匀、健壮。

试验设计:自2013年起实施施肥管理,核桃园完成采收工作后,在11月初将肥料一次性施入,施肥方式为条状沟施肥,肥料施入深度 $0\sim40$ cm,施肥区域为树冠滴水线下方,其他管理措施保持一致。采用完全随机区组设计,共设5个处理:对照(不施肥,CK)、单施化肥(T_1)、化肥配施有机肥(T_2)、化肥配施生物有机肥(T_3)、化肥、有机肥和生物有机肥配施(T_4)。每处理3次重复,每重复地块面积为296

m²。施用肥料包括:化肥(N:P₂O₅:K₂O=18:18:18,云南云天化股份有限公司)、有机肥(SOM:50%;N+P₂O₅+K₂O≥5%,河北省矾山磷矿有限公司)、生物有机肥(SOM:50%;N+P₂O₅+K₂O≥5%,活菌数>0.2亿/g,青海青葆农业生物技术开发有限公司)。施肥试验设计见表1。

表1 施肥试验设计
Table 1 Fertilization test design

处理	无机肥中氮磷钾输入量/ (kg·hm ⁻²)			外源有机碳输入量/ (kg·hm ⁻²)	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 ^a	生物有机肥 ^a
CK	0	0	0	0	0
T ₁	59.4	59.4	59.4	0	0
T ₂	59.4	59.4	59.4	1650	0
T ₃	59.4	59.4	59.4	0	1980
T ₄	59.4	59.4	59.4	1650	1980

注:表中的N、P₂O₅、K₂O含量为有机肥(生物有机肥)和化肥所含氮磷钾总和,最终保持各处理的N、P₂O₅、K₂O含量相同。N、P₂O₅、K₂O缺乏量由尿素(46%N)和硫酸钾(52%氧化钾)肥料补充。a代表外源碳分别来源于有机肥和生物有机肥的量。

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集 土壤样品采集:2022年11月初果园施肥前,采用四分法收集土壤样品。采样范围选定在每棵核桃树冠投影的三分之二区域,距树干1.5 m左右范围,避开施肥区域。在核桃树东、南、西、北4个方位分别采集0—40 cm深度的4个土样混合,并去除杂质,按照“S”型路线每个处理采集6棵核桃树的土样,再次进行充分混合为1个土样。分别用聚乙烯塑料便当盒包装好。

将所采集的0—40 cm原状土壤沿其自然裂隙轻轻掰成10 mm大小,使用低温干燥机低温(4℃)风干至含水量的8%~10%,即为待测土样。将土样分为2份,一份鲜土置于-4℃冰箱,用于测定土壤团聚体的酶活性和微生物量碳氮,另一份自然风干后用于测定土壤团聚体稳定性。

1.3.2 土壤团聚体组成和稳定性测定 采用干筛法与湿筛法分离土壤团聚体。团聚体组成分级方法有两种。

(1)土壤团聚体机械稳定性分级。采用干筛法以减少对团聚体及微生物群落原位连接的干扰。利用团聚体分析仪进行测定,将样品剥成小块后风干,通过孔径5 mm,2 mm,1 mm,0.25 mm,0.053 mm的筛组进行干筛,将土壤按粒径>5 mm,5~2 mm,2~1 mm,1~0.25 mm,0.25~0.053 mm和<0.053 mm分为6个不同粒径的团聚体。

(2)土壤团聚体水稳性分级。将对干筛后土壤团聚体进行湿筛,按粒径分为>2 mm,2~1 mm,1~

0.25 mm,0.25~0.053 mm和<0.053 mm共5个水稳性团聚体分级,利用精度为0.01 g的天平将筛组上的样品分别进行称重,计算出各级干筛团聚体所占百分比,并按比例配成50 g,将样品倒入1 000 ml沉降桶,当筛子位于振幅最低处时,向筛桶中加水,水面完全覆盖最上层筛子中土样即可,样品充分浸泡10 min,直至土样达水分饱和状态,启动团粒仪,定时,团粒仪停止后,将筛组分开,用纯水将留在筛组上的土样分别洗入已经称重的蒸发皿中,静置,把上部清液吸去后,蒸发皿放入烘箱烘干称重(精确至0.01 g)。

(3)土壤团聚体稳定性测定。采用土壤团聚体平均质量直径(Mean Weight Diameter, MWD)和几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GMD)来表征团聚体的机械稳定性和水稳性特征。各指标的计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \omega_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n \omega_i \ln \bar{x}_i\right) \quad (2)$$

$$(3-D) \lg(\bar{x}_i/x_{\max}) = \lg[\omega(\delta < \bar{x}_i)/\omega_0] \quad (3)$$

式中: ω_i 为每一粒径团聚体的重量百分比; x_i 为*i*级团聚体的平均直径(mm)。

1.3.3 土壤团聚体基本理化性质和生物学特性测定 团聚体基本理化性质测定包括:土壤含水量、pH值和全氮含量。含水量通过烘干法测定;pH值使用pH计测量;全氮含量采用凯氏消煮法,AA3连续流动分析仪测定。

生物学特性测定包括土壤团聚体酶活性、微生物量碳和微生物量氮。土壤团聚体酶(β -葡萄糖苷酶、 β -木糖苷酶、 β -纤维二糖苷酶、乙酰氨基葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶)活性测定参考Deforest方法^[13]。土壤微生物量碳(Soil Microbial Biomass Carbon, SMBC)通过TOC分析仪和氯仿熏蒸提取法测定,土壤微生物量氮(Soil Microbial Biomass Nitrogen, SMBN)采用AA3连续流动分析仪和氯仿熏蒸提取法测定。

1.3.4 数据处理 采用Microsoft Excel 2019进行数据统计,SPSS 25.0进行单因素方差和显著性差异,采用Origin 2021分析数据并进行图片绘制。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对核桃园土壤团聚体稳定性的影响

2.1.1 长期施肥对土壤机械稳定性团聚体的影响 长期施肥后不同处理的土样经干筛后,土壤机械稳定性团聚体组成见表2。表2显示:(1)施肥显著影响团聚体粒径分布,各处理以1~0.25 mm粒级占比

最高(CK除外)。CK处理下团聚体主要分布于>5 mm和5~2 mm粒级,而施肥处理则向中小粒径(1~0.25 mm)集中,结构更趋稳定。(2) 5~2 mm和2~1 mm粒级除外,其他粒径团聚体在不同处理间差异显著。>5 mm粒级中, T_4 显著低于 T_2 和CK;1~0.25 mm粒级中, T_4 与 T_1 显著高于CK;0.25~0.053 mm粒级中, T_3 高于CK和 T_1 ; <0.053 mm粒级中, T_4 显著低于 T_1, T_2, T_3 。说明 T_4 处理有助于促进中小粒径团聚体形成,提升土壤结构稳定性。

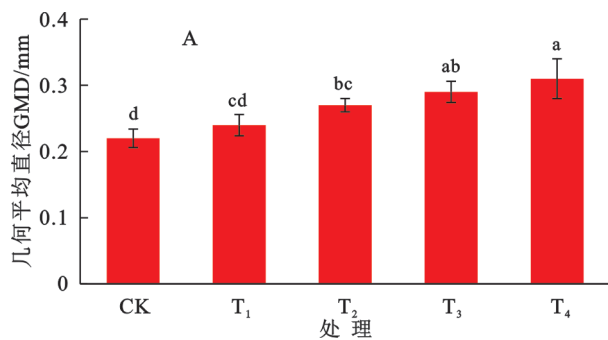
表 2 土壤机械稳定性团聚体组成

Table 2 Composition of mechanically stable soil aggregates

处理	数量占比/%					
	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	0.25~0.05 mm	<0.053 mm
CK	23.87a	22.84a	20.37a	21.62c	8.82b	2.43ab
T_1	17.47bc	20.68a	20.94a	27.50ab	10.42b	2.94a
T_2	21.01ab	19.72a	18.68a	24.43bc	13.50ab	1.74bc
T_3	17.77bc	19.43a	17.78a	25.97abc	16.28a	2.78a
T_4	14.11c	21.92a	19.75a	29.86a	13.13ab	1.17c

注:同列中相同的字母代表方差分析未达显著水平($p>0.05$),不同字母代表方差分析达到显著水平($0.01<p<0.05$)下同。

2.1.2 长期施肥对土壤水稳性团聚体的影响 对干筛后土壤团聚体进行湿筛,按粒径分为>2 mm,2~1 mm,1~0.25 mm,0.25~0.053 mm和<0.053 mm共5个水稳性团聚体分级,各粒级土壤团聚体组成见表3。表3显示:(1)各处理中0.25~0.053 mm粒级团聚体占比最高, T_2, T_3, T_4 分布一致,均为:0.25~0.053 mm>1~0.25 mm>(<0.053 mm)>(>2 mm)>2~1 mm。(2)同一粒级团聚体在不同施肥处理间差异显



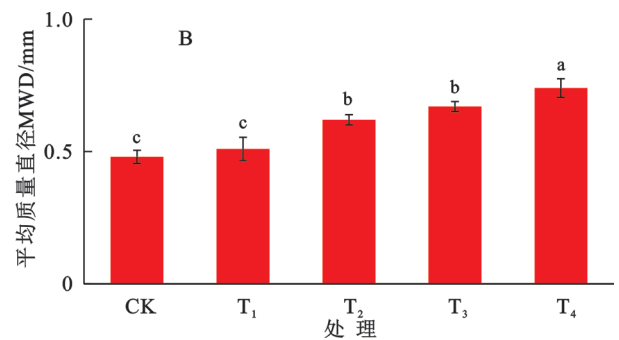
著。>2 mm和2~1 mm粒级中, T_4 显著高于其他处理;1~0.25 mm粒级中, T_3 和 T_4 显著高于CK和 T_1 ;0.25~0.053 mm粒级中, T_4 显著低于CK和 T_1 ; <0.053 mm粒级中, T_2, T_3, T_4 均低于CK。说明 T_4 有利于提升较大粒径团聚体比例,优化结构稳定性。

表 3 不同施肥处理土壤水稳性团聚体组成

Table 3 Composition of water-stable soil aggregates under different fertilization treatments

处理	数量占比/%				
	>2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
CK	4.49c	3.04c	9.49c	66.53a	16.39a
T_1	4.41c	4.23bc	12.65bc	66.46a	12.16ab
T_2	5.79b	4.76bc	17.28ab	61.80ab	10.29b
T_3	6.23b	5.50bc	19.79a	59.49ab	8.87b
T_4	6.91a	6.02a	23.33a	55.45b	8.21b

2.1.3 各粒级团聚体数量与团聚体稳定性之间的关系 土壤团聚体的稳定性常通过平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)进行表征,两者可有效反映团聚体抗解体能力。不同施肥处理土壤几何平均直径和平均重量直径见图1。图1显示:(1)各施肥处理均显著提高了土壤团聚体的平均重量直径和几何平均直径,其中 T_4 处理效果最优,MWD和GMD分别为CK的1.69倍和1.65倍,显著高于 T_1, T_2 和 T_3 ,表明 T_4 最有利于提升团聚体稳定性。(2)CK与 T_2, T_3 和 T_4 处理间均差异显著,但CK与 T_1 处理间差异不显著。可能与施肥种类、施肥方式及施用量有关。综上,长期施肥可有效改善核桃园土壤结构, T_4 处理表现尤为突出。



注:相同的字母代表方差分析未达显著水平($p>0.05$),不同的字母代表方差分析达到显著水平($0.01<p<0.05$),下同。

图 1 不同施肥处理土壤几何平均直径(GMD)、平均质量直径(MWD)

Fig. 1 Geometric mean diameter (GMD) and mean weight diameter (MWD) of soil under different fertilization treatments

2.2 长期施肥对核桃园土壤团聚体理化性质的影响

2.2.1 长期施肥对土壤团聚体pH值的影响 由表4可见,各粒径团聚体在同一施肥处理下pH值差异不显著,但不同施肥处理显著影响pH值($p<0.05$)。总体趋势为 $T_4>T_3>T_2>T_1>CK$, T_4 处理在各粒径组中pH最高(8.18~8.45);CK处理中<0.053 mm粒径

pH值最低,仅为7.48。长期配施肥中的 T_4 处理形成的较偏碱土壤,更有利于核桃树的生长发育,对构建可持续的核桃园土壤养分管理体系更有利。

2.2.2 长期施肥对土壤含水率的影响 不同施肥处理下,核桃园土壤的含水量变化见图2。图2显示,长期施肥显著提高了土壤含水率($p<0.05$),各处理提高

土壤水分的程度不同,呈现 $T_4 > T_3 > T_2 > T_1 > CK$ 的趋势,范围为11.50%~13.72%。 T_4 处理土壤含水率最高,分别为CK, T_1 , T_2 和 T_3 的1.19, 1.12, 1.06, 1.05

倍。虽 T_3 与 T_4 , T_2 与 T_3 差异不显著,但 T_2 , T_3 , T_4 处理均显著高于CK和 T_1 ,表明施肥有助提升土壤持水能力,且化肥、有机肥和生物菌肥配施的效果最好。

表4 不同施肥处理下土壤团聚体pH值
Table 4 pH values of soil aggregates under different fertilization treatments

处理	>5 mm	>2 mm	>1 mm	>0.25 mm	>0.053 mm	<0.053 mm
CK	7.56±0.009d	7.49±0.012c	7.72±0.064d	7.73±0.019d	7.58±0.023d	7.48±0.006e
T_1	7.82±0.003c	7.82±0.029b	7.79±0.026d	7.77±0.075d	7.78±0.026cd	7.80±0.039d
T_2	7.83±0.012c	7.85±0.027b	7.91±0.009c	7.88±0.022c	7.85±0.065c	7.69±0.018c
T_3	7.99±0.035b	7.89±0.045b	8.01±0.036b	7.99±0.015b	8.02±0.077b	8.10±0.018b
T_4	8.45±0.067a	8.26±0.069a	8.23±0.089a	8.18±0.012a	8.20±0.050a	8.33±0.029a

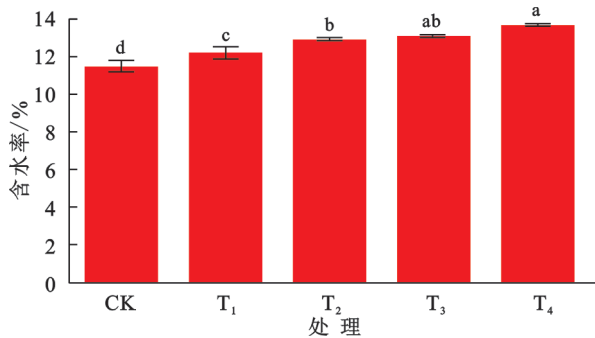


图2 不同施肥处理下土壤含水率的变化

Fig. 2 Changes in soil moisture content under different fertilization treatments

2.3 长期施肥对核桃园土壤团聚体生物学特性的影响

2.3.1 长期施肥对土壤团聚体内关键酶活性的影响 由图3看出,不同施肥处理均显著提高了土壤团聚体中关键酶(NAG, ACP, CBH, β G, β X)的活性,且在不同粒径组中呈现出一致规律:(1)在同一粒径条件下,酶活性总体表现为 $T_4 > T_3 > T_2 > T_1 > CK$;(2)在各施肥处理下,酶活性随粒径减小呈现先升后降趋势,活性依次为 $1 \sim 0.25 \text{ mm} > 0.25 \sim 0.053 \text{ mm} > 2 \sim 1 \text{ mm} > 2 \sim 5 \text{ mm} > (>5 \text{ mm}) > (<0.053 \text{ mm})$;且各处理间酶活性差异显著($0.01 < p < 0.05$)。

图3还显示:(1)在 $1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒径组中, T_4 处理显著提高了各类酶活性,达到最大值。其中,NAG酶活性为575.32 nmol/(g·h),分别为CK, T_1 , T_2 和 T_3 处理的1.73, 1.63, 1.25, 1.18倍;CBH酶活性为462.24 nmol/(g·h),是CK处理的2.40倍;ACP和 β G酶活性亦分别提高至495.37, 695.37 nmol/(g·h),均达到显著水平。(2)在 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 粒径中, T_4 处理显著提升 β X酶活性[179.34 nmol/(g·h)],较CK提高明显。 T_2 与 T_3 之间无显著差异,可能与有机肥及生物菌肥施用量相对不足有关,未能有效增强微团聚体生物活性。(3) $<0.053 \text{ mm}$ 粒径团聚体中的酶活性整体较低,但 T_4 处理依然显著提升了其酶活

性,且与其他处理差异极显著($p < 0.01$),表明复合配肥对微团聚体酶活性具有显著促进作用。

2.3.2 长期施肥对土壤团聚体内微生物量碳氮的影响 (1)土壤团聚体内微生物量碳(SMBC)和微生物量氮(SMBN)。图4可见,土壤团聚体粒径显著影响微生物量碳(SMBC)和氮(SMBN)含量,整体随粒径减小呈现先升后降的趋势,依次为 $1 \sim 0.25 \text{ mm} > 0.25 \sim 0.053 \text{ mm} > 2 \sim 1 \text{ mm} > 2 \sim 5 \text{ mm} > (>5 \text{ mm}) > (<0.053 \text{ mm})$ 。 T_4 处理在各粒径组中均显著提高了SMBC和SMBN含量($p < 0.01$),其中 $1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒径组提升幅度最大,SMBC为CK的2.05倍,SMBN达78.8 mg/kg。尽管 $<0.053 \text{ mm}$ 团聚体微生物量较低, T_4 处理仍显著促进其SMBC和SMBN积累,表明化肥、有机肥与生物菌肥配施可激发微团聚体微生物活性。

图5显示,不同施肥措施对微生物碳氮比(SMBC/SMBN)和微生物氮/总氮比(SMBN/TN)产生显著影响。 T_1 处理提高了SMBC/SMBN,尤其在 $<0.053 \text{ mm}$ 粒径中达到8.15,但 T_3 与 T_4 处理降低了SMBC/SMBN的同时,显著提升了SMBN/TN比值,以 T_4 处理最为显著,较CK提高1.79倍。

3 讨论与结论

3.1 讨论

目前,果园土壤质量的研究多聚焦于土壤理化属性的整体评估,对土壤团聚体这一微观结构单元的生态功能关注相对薄弱。因此本研究在前人研究的基础上细化了土壤团聚体的分类,在干筛处理增加了 $2 \sim 1 \text{ mm}$, $1 \sim 0.25 \text{ mm}$;在湿筛处理增加了 $1 \sim 0.5 \text{ mm}$, $0.5 \sim 0.25 \text{ mm}$ 。土壤团聚体作为土壤结构稳定性的基本构建单位^[14],不仅直接影响水分保持、气体交换与抗侵蚀能力,更在土壤养分储存与微生物栖息空间构建中发挥着不可替代的作用^[15]。

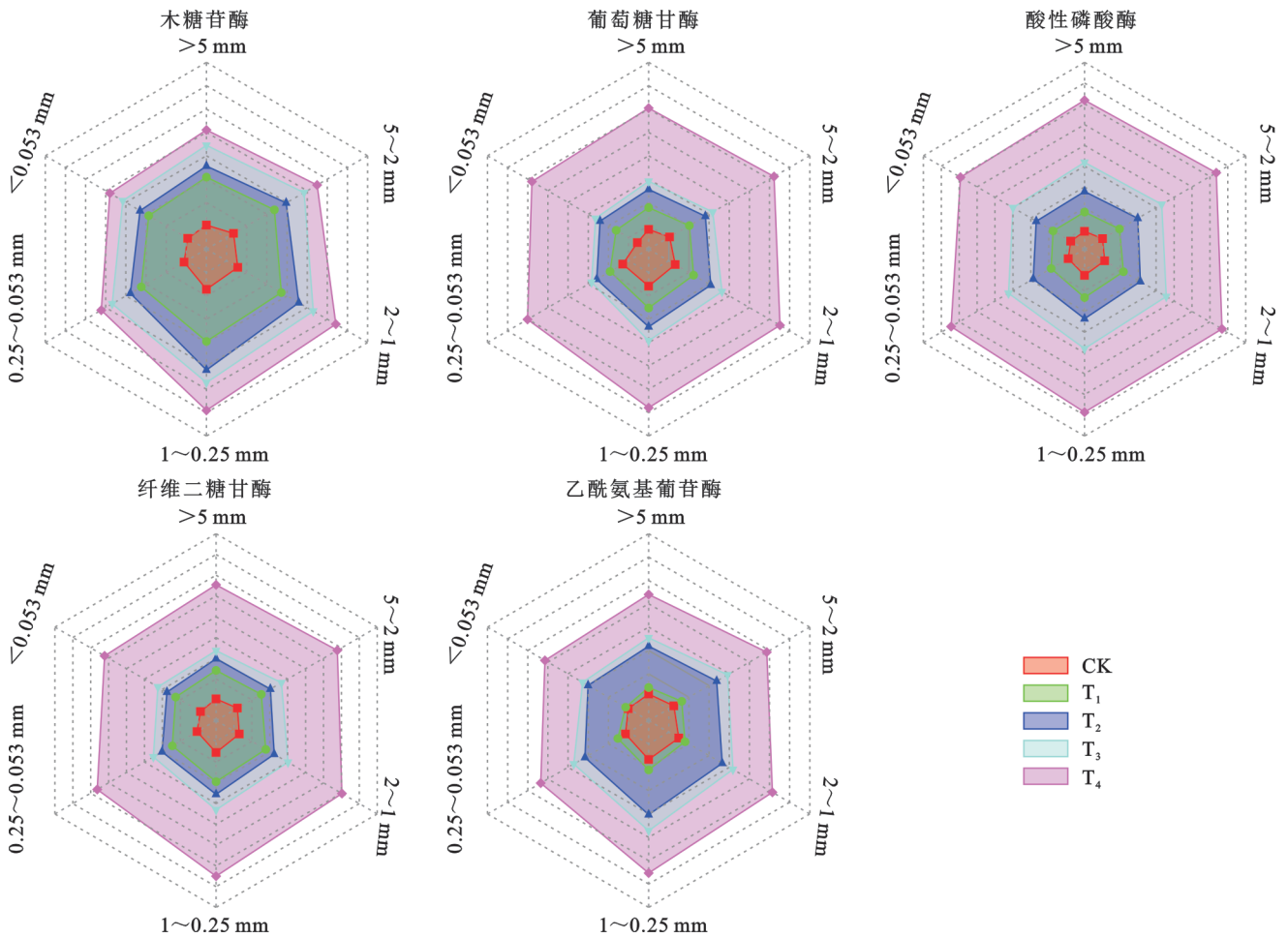


图 3 土壤团聚体酶活性变化
Fig. 3 Changes in enzyme activity of soil aggregates

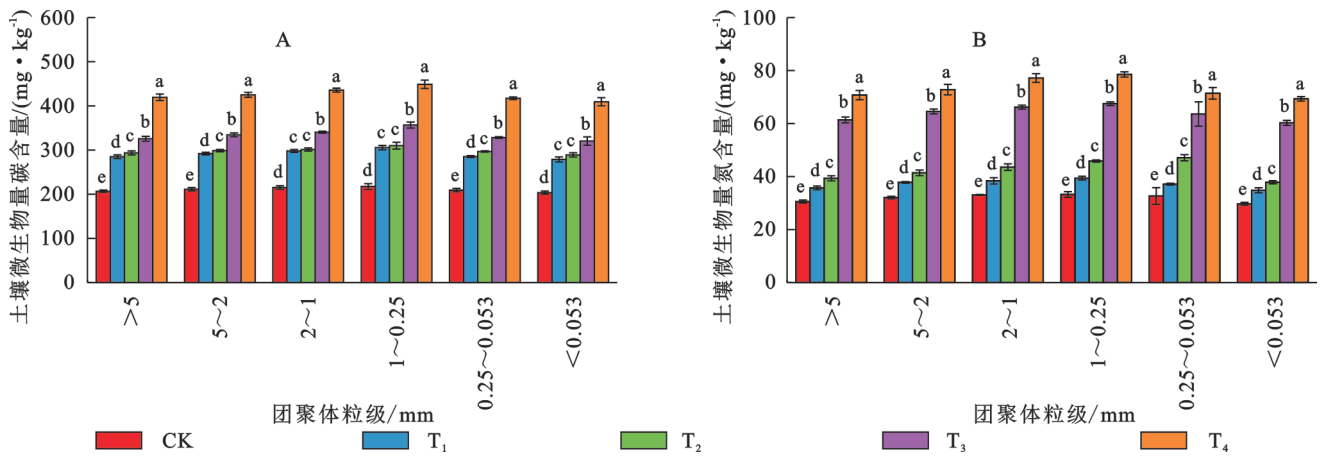


图 4 土壤微生物量碳/氮含量变化
Fig. 4 Changes in carbon and nitrogen content of soil microbial biomass

3.1.1 施肥调控下土壤团聚体结构的生态功能重塑 已有研究证明施肥可改善土壤团聚体结构,本研究表明,长期施肥显著改变了核桃园土壤团聚体的粒径组成与结构稳定性,这不仅是物理粒级变化的表征,更反映出土壤系统生态功能的重构过程。土壤团聚体作为连接矿质组分、有机质和生物群落的关键界面,其粒径分布格局变化隐含了团聚体形成与解体过程的能量输入路径^[16-17]。T₄处理下中小

粒径团聚体(1~0.25 mm, 0.25~0.053 mm)占比提升,提示有机无机协同施肥增强了团聚体的胶结稳定性和碳素保护结构。这一现象或与微生物胶结物质(如胞外多聚物 EPS)增强、腐殖酸等有机胶黏剂充足供应密切相关,激发了微生物多样性和代谢潜能,促进有机质向稳定结构的转化过程,从而加速团聚体的形成与稳定,表明其系统内部“粒径—碳源—结构”三者之间的反馈增强机制正在形成^[18]。

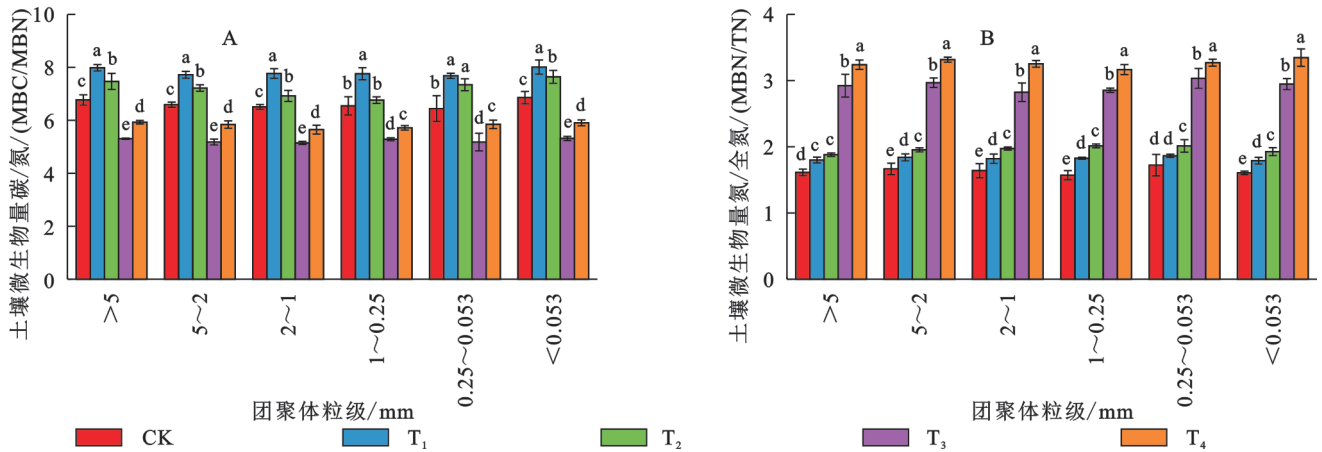


图5 不同施肥处理土壤微生物量碳氮比和微生物氮/总氮比

Fig. 5 Carbon-nitrogen ratio and microbial nitrogen-total nitrogen ratio of soil microbial biomass under different fertilization treatments

3.1.2 微生物-团聚体耦合系统的生物代谢强化研究表明施肥可提高土壤团聚体主要酶活性,前人也发现施肥可提高土壤酶活性^[19-20]。土壤团聚体的内部生境决定了微生物多样性、代谢强度与碳氮循环速率^[21-22]。在T₄处理下,微生物量碳氮显著上升,尤其在1~0.25 mm 粒径中表现最为突出,说明此粒径范围构建了相对适宜微生物代谢的微环境。结合酶活性数据发现,这一粒径的团聚体同时具有更高的胞外酶表达能力,佐证“中小粒径团聚体为代谢热点”的假说^[23]。尤其在碳水化合物降解酶(如 β -葡聚糖苷酶)与氮代谢相关酶(如NAG)活性增强的背景下,表明施肥不仅激发了团聚体内部的代谢,更有效提升了有机质向稳定结构的转化效率^[24-25],体现出“施肥—结构—代谢”的正向耦合路径。

3.1.3 团聚体理化性质的调节机制与系统响应 施肥对土壤团聚体pH和含水率的改善,为微生物活性与酶功能提供了适宜的生境基础^[26-27]。T₄处理下pH值升高较多,趋于中性偏碱,缓解了核桃园常见的土壤酸化风险。与此同时,团聚体含水率升高可能源于有机质增强水分滞留能力以及团聚体结构优化所带来的孔隙网络稳定化。这种双重作用机制不仅有助于提升团聚体稳定性(表现在MWD与GMD的升高),更强化了土壤作为“养分缓释库”与“微生物反应器”的复合功能^[28]。值得指出的是,pH调节亦可能通过影响酶活性和微生物群落结构进一步反馈调控团聚体内生物过程,构成一个动态协同系统。

3.1.4 有机无机协同施肥的系统优化效应 本研究结果整体表明,化肥、有机肥与生物菌肥的协同施用远优于单一或部分组合施肥方式。T₄处理不仅改善了团聚体结构稳定性与粒径分布,更通过强化微生物功能与调节土壤理化性质,系统性地提升了团聚

体的生态功能。这种协同效应具有以下特征:结构-功能并进、代谢-环境互促、微区-系统联动,呈现出土壤系统“结构-过程-功能”一体化优化的典型案例。因此,协同施肥不仅是一种养分管理策略,更是恢复和构建土壤生态功能网络的关键路径。

尽管本研究已系统揭示了长期施肥对核桃园土壤团聚体的多维影响,但仍存在以下局限:(1)未进行土壤分层采样,限制了对垂直纵向结构功能变化的理解;(2)缺乏微生物群落结构与代谢通路的深入探析,无法解析功能增强背后的具体生物机制。未来可结合高通量测序、代谢组分析与团聚体三维成像技术,深入挖掘粒径团聚体中的功能菌群构建机制与碳氮转化路径。同时,建议开展长期定位监测,评估不同施肥方式对土壤结构稳定性和果园生态服务功能的持续影响,为果园土壤可持续管理提供坚实基础。

3.2 结论

本研究通过长期定位试验,系统评估了不同施肥模式对果园土壤团聚体结构、理化性质及微生物特性的影响。结果表明,有机-无机-生物菌肥三者协同施肥即T₄处理,显著提升中小粒径团聚体比例,改善粒径分布,提升土壤pH值与含水量,从而增强土壤结构稳定性与理化特性。T₄处理显著提升团聚体酶活性,特别是在中粒径粒径中,促进微生物功能与养分循环协同提升。中小团聚体1~0.25 mm与0.25~0.053 mm 粒径团聚体中SMBC与SMBN含量显著高于大团聚体,成为微生物富集与养分转化关键载体,展现出更强生态功能。综上,化肥、有机肥与生物菌肥三肥配施可显著改善果园土壤结构与生态功能,为提升土壤质量与实现果园丰产优质高效和可持续发展提供理论依据和实践指导。

参考文献(References):

- [1] 黄小辉,冯大兰,杨华均,等.不同施肥处理对‘渝城1号’核桃产量、品质和土壤肥力的影响[J].东北林业大学学报,2024,52(3):97-102,140.
Huang X H, Feng D L, Yang H J, et al. Effects of different fertilization treatments on the yield, quality and soil fertility of ‘Yucheng 1’ *Juglans regia* L[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024,52(3):97-102,140.
- [2] 赵书岗,高仪,高晰宇,等.不同施肥处理对‘清香’核桃产量和品质的影响[J].北方园艺,2019(23):42-47.
Zhao S G, Gao Y, Gao X Y, et al. Effects on yield and quality of different fertilization treatments in ‘Qingxiang’ walnut[J]. Northern Horticulture, 2019(23):42-47.
- [3] 刘杜玲,张博勇,彭少兵,等.氮磷钾配方施肥对核桃产量和品质指标的影响[J].西北林学院学报,2018,33(6):113-117.
Liu D L, Zhang B Y, Peng S B, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium formula fertilizers on the yield and quality of walnut fruit[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018,33(6):113-117.
- [4] 刘维,司若彤,范家慧,等.不同施肥模式对芒果产量、品质的影响[J].热带作物学报,2021,42(3):761-768.
Liu W, Si R T, Fan J H, et al. Effects of different fertilization patterns on yield and quality of mango[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021,42(3):761-768.
- [5] 黄国勤,王兴祥,钱海燕,等.施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J].生态环境,2004,13(4):656-660.
Huang G Q, Wang X X, Qian H Y, et al. Negative impact of inorganic fertilizers application on agricultural environment and its countermeasures [J]. Ecology and Environment, 2004,13(4):656-660.
- [6] 关松,窦森,胡永哲,等.添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响[J].水土保持学报,2010,24(4):187-191.
Guan S, Dou S, Hu Y Z, et al. Effects of application of corn stalk on distribution of C and N in black soil aggregates[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(4):187-191.
- [7] 陶云彬,杨佳佳,章日亮,等.有机肥替代、化肥养分调控对土壤理化性状、枇杷果实品质和产量的影响[J].浙江农业科学,2019,60(9):1540-1541,1543.
Tao Y B, Yang J J, Zhang R L, et al. Effects of substituting with organic fertilizer and nutrients regulation of chemical fertilizer on physical and chemical properties of soil, quality and yield of loquats [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019,60(9):1540-1541,1543.
- [8] Majumder B, Kumar P, Pathak A S, et al. Soil aggregates as nutrient reservoirs: implications for soil fertility and sustainable agriculture [J]. Agricultural Systems, 2010,103(3):137-142.
- [9] 蔡立群,齐鹏,张仁陟.保护性耕作对麦-豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):141-145.
Cai L Q, Qi P, Zhang R Z. Effects of conservation tillage measures on soil aggregates stability and soil organic carbon in two sequence rotation system with spring wheat and field pea[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008,22(2):141-145.
- [10] 卢树昌,陈清,张福锁,等.河北果园主分布区土壤磷素投入特点及磷负荷风险分析[J].中国农业科学,2008,41(10):3149-3157.
Lu S C, Chen Q, Zhang F S, et al. Characteristics of soil phosphorus input and phosphorus load risk in major orchards region of Hebei [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008,41(10):3149-3157.
- [11] 热伊罕古丽·喀迪尔,刘文利,周一诺,等.玉米多品种间作对土壤团聚体组成和稳定性的影响[J].浙江农业学报,2024,36(6):1339-1346.
Reihanguli Kadir, Liu W L, Zhou Y N, et al. Effects of intercropping of maize varieties on soil aggregate composition and stability[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024,36(6):1339-1346.
- [12] 罗贞宝,李志宏,朱经纬,等.长期有机无机配施对土壤团聚体及有机碳的影响[J].中国土壤与肥料,2024(10):1-8.
Luo Z B, Li Z H, Zhu J W, et al. Effects of long-term combined organic-inorganic fertilizer application on soil aggregates and organic carbon [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(10):1-8.
- [13] DeForest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and I[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009,41(6):1180-1186.
- [14] 段文学,张海燕,解备涛,等.化肥和生物有机肥配施对鲜食型甘薯块根产量、品质及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(11):1971-1980.
Duan W X, Zhang H Y, Xie B T, et al. Effects of chemical and bio-organic fertilizers on *Tuber* yield, quality, and soil fertility of edible sweetpotato[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021,27(11):1971-1980.
- [15] 解钰,朱同彬.氮肥和秸秆用量对水稻-小麦轮作体系土壤团聚体组分及碳氮分布的影响[J].江苏农业科学,2015,43(5):310-314.
Xie Y, Zhu T B. Effects of nitrogen fertilizer and straw dosage on soil aggregate composition and carbon and nitrogen distribution in rice-wheat rotation system [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015,43(5):310-314.
- [16] 阳祥,金强,李先德,等.茶园管理模式对土壤团聚体稳定性与碳氮含量的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(5):81-89.
Yang X, Jin Q, Li X D, et al. Effects of management

- modes on soil aggregate stability and contents of carbon and nitrogen in tea garden[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(5):81-89.
- [17] 王磊, 高方胜, 曹逼力, 等. 有机肥和化肥配施对不同熟期大白菜土壤生物特性及产量品质的影响[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(1):66-72.
- Wang L, Gao F S, Cao B L, et al. Effects of combined organic fertilizer and chemical fertilizer application on soil biological characteristics, yield, and quality of Chinese cabbage with different maturity periods [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(1):66-72.
- [18] 季卫英, 管丹蓉, 宓立峰, 等. 不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(6):377-386.
- Ji W Y, Guan D R, Mi L F, et al. Effects of different land-use patterns on soil aggregate stability and contents of carbon and nitrogen [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(6):377-386.
- [19] 郑冬梅, 王雪萌, 毛莹, 等. 生物炭对桑树/苜蓿改良沙化土壤团聚体稳定性及酶活性的影响[J]. *沈阳大学学报: 自然科学版*, 2024, 36(5):383-390, 410.
- Zheng D M, Wang X M, Mao Y, et al. Effect of biochar on stability and enzymatic activity of sandy soil agglomerates amended with mulberry/clover [J]. *Journal of Shenyang University: Natural Science*, 2024, 36(5):383-390, 410.
- [20] 吕晴晴, 劳丞一, 徐慧芳, 等. 稻田不同水旱复种模式对土壤团聚体及碳氮的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2024, 45(6):949-955.
- Lü Q Q, Lao C Y, Xu H F, et al. Effects of different paddy-upland multiple cropping patterns on soil aggregates, carbon and nitrogen in paddy fields [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2024, 45(6):949-955.
- [21] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1):7-31.
- [22] 黄海梅, 颜金柳, 李佳君, 等. 马尾松人工林异龄混交改造对土壤团聚体酶活性及酶化学计量比的影响[J]. *广西科学*, 2024, 31(3):427-438.
- Huang H M, Yan J L, Li J J, et al. Effects of introducing other tree species of different ages into *Pinus massoniana* plantation on activities and stoichiometric ratios of enzymes associated with soil aggregates [J]. *Guangxi Sciences*, 2024, 31(3):427-438.
- [23] 王贞玉, 罗春艳, 唐振亚, 等. 施用烟秆炭对三七连作土壤酶活性和微生物群落结构的影响[J]. *云南师范大学学报: 自然科学版*, 2024, 44(5):43-48.
- Wang Z Y, Luo C Y, Tang Z Y, et al. The effect of tobacco stem biochar on soil enzyme activity and microbial community structure in continuous cropping soil of *Panax notoginseng* [J]. *Journal of Yunnan Normal University: Natural Sciences Edition*, 2024, 44(5):43-48.
- [24] 蒲子天, 王红, 赵斌, 等. 不同土壤改良物料对连作黄芩生长及土壤酶活性的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(7):189-198.
- Pu Z T, Wang H, Zhao B, et al. Effects of different soil amendments on growth of *Scutellaria baicalensis* and soil enzyme activities in continuous cropping [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(7):189-198.
- [25] 谢钧宇, 曹寒冰, 孟会生, 等. 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3):274-281, 290.
- Xie J Y, Cao H B, Meng H S, et al. Effects of different fertilization regimes and fertilization ages on size distribution and stability of soil aggregates [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3):274-281, 290.
- [26] 孙彩丽, 薛蕙, 刘国彬, 等. 黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3):550-561.
- Sun C L, Xue S, Liu G B, et al. Effects of long-term fertilization on soil particles and microaggregate distribution in the loess area [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3):550-561.
- [27] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(1):176-182.
- Liu E K, Zhao B Q, Li X Y, et al. Biological properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1):176-182.
- [28] 贺海耘. 长期施肥对核桃品质和根际土壤微生物及酶活性的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- He H Y. Effects of long-term fertilization on walnut quality and rhizosphere soil microbial and enzyme activities [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.