施肥模式对核桃园土壤团聚体养分含量及果实品质的影响

孙琳娜[1,2], 翟梅枝[2]

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

摘　要: [目的]探索提升核桃果实产量、品质及土壤肥力的最优施肥策略,为核桃科学合理施肥提供理论依据与技术支持,促进核桃产业的可持续发展。[方法]以'香玲'核桃为试材,设置5种施肥处理:①不施肥(CK),②单施化肥(T_1),③化肥+有机肥(T_2),④化肥+生物菌肥(T_3),⑤化肥+有机肥+生物菌肥(T_4)。通过测定核桃产量、果实品质及不同粒径土壤团聚体的养分分布,分析施肥对果实品质与土壤养分的影响,并探讨二者之间的相关性。[结果]施肥显著提升了不同粒径土壤团聚体的养分含量,尤其在1~0.25 mm粒径团聚体中,全量养分与速效养分含量均为最高。除有效磷与全磷外,T_4处理在各粒径的土壤有机质、全氮、全钾、速效钾、硝态氮及铵态氮含量均显著高于CK,T_1,T_2和T_3。不同施肥模式均提高了核桃果实的三径均值、单果重、仁重、出仁率、含油率、核桃产量、总氨基酸、蛋白质、脂肪酸及多种营养元素的水平。T_4处理显著提高核桃果实4个品质指标:①三径均值最大,为37.69 mm,单果干重13.46 g,较CK提高30%;②仁重7.59 g,是CK的1.45倍;③壳厚最小,为1.30 mm,较CK减少22%;④出仁率较CK提高9%,产量为CK的6.5倍。果实营养品质及产量与各粒径土壤团聚体中全量及速效养分呈正相关;且果实的三径均值、干重、仁重、含油率与脂肪酸含量间存在显著正相关关系。[结论]化肥与有机肥和生物菌肥(T_4)配施能够显著改善土壤团聚体养分,进而提高核桃果实产量与品质,为核桃园施肥管理提供了有效的优化模式。

关键词: 配施肥; 核桃; 土壤团聚体质量; 产量品质

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2026)04-0150-10　　**中图分类号:** S664.1

文献参数: 孙琳娜, 翟梅枝.施肥模式对核桃园土壤团聚体养分含量及果实品质的影响[J].水土保持通报, 2026, 46(4): 150-159. Sun Linna, Zhai Meizhi. Effects of fertilization patterns on nutrient contents of soil aggregates and fruit quality in walnut orchards [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 150-159.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.022　　**CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.022**

Effects of fertilization patterns on nutrient contents of soil aggregates and fruit quality in walnut orchards

Sun Linna[1,2], Zhai Meizhi[2]

(1.*Luoyun Water Management Division*, *Suqian*, *Jiangsu* 223800, *China*;
2.*College of Forestry*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] The optimal fertilization strategy for improving walnut fruit yield, quality and soil fertility was investigated in order to provide a theoretical basis and technical support for scientific and rational fertilization in walnut orchards and to promote the sustainable development of the walnut industry. [Methods] 'Xiangling' walnut was used as the test material, and five fertilization treatments were established: ① no fertilization (CK), ② chemical fertilizer alone (T_1), ③ chemical fertilizer combined with organic fertilizer (T_2), ④ chemical fertilizer combined with biofertilizer (T_3), and ⑤ chemical fertilizer combined with organic fertilizer and biofertilizer (T_4). Walnut yield, fruit quality, and the nutrient distribution in soil aggregates of different particle sizes were determined to analyze the effects of fertilization on fruit quality and soil nutrients, and to explore their

收稿日期: 2025-10-22　　**修回日期:** 2026-01-30　　**采用日期:** 2026-01-31

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(汉族),江苏徐州人,硕士,助理工程师,主要从事核桃园营养与肥料研究。Email:sun19981017@yeah.net。

通信作者: 翟梅枝(1963—),女(汉族),河南西平人,博士,教授,主要从事核桃良种选育、高效栽培。Email:plum-zhai@163.com。

correlations. [Results] Fertilization significantly increased nutrient contents in soil aggregates of different particle sizes, especially in the 1—0.25 mm aggregates, where both total and available nutrient contents were the highest. Except for available phosphorus and total phosphorus, the contents of soil organic matter, total nitrogen, total potassium, available potassium, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen under T_4 were significantly higher than those under CK, T_1, T_2, and T_3 across all particle sizes. All fertilization patterns improved the mean of three diameters, single-fruit weight, kernel weight, kernel yield rate, oil content, walnut yield, total amino acids, protein, fatty acids, and various nutrient element contents. T_4 significantly improved four fruit quality indicators: ① the mean of three diameters reached 37.69 mm and the single-fruit dry weight reached 13.46 g, representing a 30% increase compared with CK. ② Kernel weight reached 7.59 g, 1.45 times that of CK. ③ Shell thickness was the lowest at 1.30 mm, 22% lower than CK. ④ Kernel yield rate increased by 9% compared with CK, and the yield was 6.5 times that of CK. Fruit nutritional quality and yield were positively correlated with total and available nutrients in soil aggregates of different particle sizes, and significant positive correlations were also observed among the mean of three diameters, dry weight, kernel weight, oil content, and fatty acid content. [Conclusion] The combined application of chemical fertilizer, organic fertilizer and biofertilizer (T_4) can significantly improve soil aggregate nutrient status, thereby enhancing walnut fruit yield and quality, and providing an effective fertilization model for walnut orchard management.

Keywords: integrated fertilization; walnut; soil aggregate quality; yield and quality

核桃(*Juglans* regia L.)是中国重要的木本油料树种,其种仁含油量在木本油料作物中居于首位[1]。大力发展核桃产业对提升油料自给能力、保障国家粮油安全具有重要战略意义[2]。核桃富含多酚、黄酮类化合物、维生素E及不饱和脂肪酸等多种功能性成分,具有延缓动脉粥样硬化、调节血液黏稠度等多重生理活性,是优质的天然抗氧化膳食来源[3-4]。截至2020年,中国核桃种植面积、年产量等指标均居世界前列,年产量达4.80×10^6 t[5]。陕西省作为核桃主产区之一,2018年种植面积达7.78×10^5 hm^2,产量3.54×10^5 t,总产值7.33×10^9元,核桃已成为区域农业经济的重要支柱[6]。然而,与樱桃、苹果等果树相比,核桃的经济效益仍有较大提升空间,已有研究指出,这一差距与长期不合理施肥导致的土壤退化密切相关[7]。

长期施肥作为农业管理中持续影响土壤质量的关键措施,通过调控土壤理化性质与生物学过程,对作物产量和品质产生累积性效应[8-9]。目前,为实现核桃高产优质目标,研究多集中于施肥用量与配比,尤其侧重氮、磷、钾等大量元素的施用效应。例如,张博勇等[10]采用"3 414"设计研究了氮、磷、钾配施对"辽核4号"核桃品质的影响;Min Anmin等[11]发现磷肥对核桃产量的贡献高于氮肥和钾肥;赵书岗等[12]研究表明,氮、磷、钾肥配施可显著提高"清香"核桃的产量与经济性状。在施肥模式方面,有机肥覆盖被证实能有效提升土壤有机质和有效养分含量[13];Mazzon等[14]进一步指出,有机肥在提升土壤碳氮库及促进相关酶活性方面优于单施化肥。然而,现有研究多聚焦于土壤整体养分状况,关于施肥对土壤团聚体养分空间分布与核桃产量品质形成的耦合关系仍不明确,这严重制约了核桃园精准施肥策略的优化。同时,在核桃主产区,长期过量施用化肥已引发土壤酸化,结构劣化,微生物区系失衡及养分效率下降等一系列生态问题,严重制约了核桃产业的可持续发展[15]。

因此,深入研究长期施肥对核桃园土壤生态系统的影响,对推动核桃产业提质增效具有重要意义。本研究依托西北农林科技大学核桃推广示范站的长期定位施肥试验,重点解析不同施肥模式下土壤团聚体的养分分配特征,系统阐明团聚体养分有效性对核桃产量与品质形成的驱动机制,为核桃园土壤健康管理与精准施肥提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验地位于陕西省商洛市山阳县西北农林科技大学核桃推广示范站(109°56′E,35°21′N),当地气候是亚热带半湿润季风气候,因为地处山区,具有很多山地气候的特点,试验站位于秦岭东南侧,海拔838 m,年平均气温13 ℃,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。施肥试验布设前土壤基础性质指标:pH值为7.25,有机质含量为10.34 g/kg,全氮为1.22 g/kg,速效磷为29.06 mg/kg,速效钾为98.82 mg/kg。

1.2　试验设计

(1)供试品种。本研究以试验站主栽品种11 a

生‘香玲’核桃（2012年栽植）为研究对象。果实通常于8月下旬成熟。2012年嫁接苗建园，株行距为5 m×6 m，即：330株/hm^2，南北行向定植。

（2）试验处理。长期定位施肥试验始于2013年，本试验采用随机区组的方法，设置5个处理：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），每处理重复3次，每小区面积约为360 m^2，为防止处理间的干扰，各处理之间设置一行宽6 m的保护行。施肥方案结合树龄及当时测定的土壤养分实际情况制定而成，所有肥料于每年11月底前作为基肥施入条形沟（深度20—40 cm，宽度20—30 cm），并与土壤充分混匀。

（3）供试肥料。化肥（N:P_2O_5:K_2O=18:18:18），有机肥（SOM：50%；N+P_2O_5+K_2O≥5%，具体为N+P_2O_5+K_2O=1.83+2.34+1.32），生物有机肥（SOM：50%；N+P_2O_5+K_2O≥5%，具体为活菌数>2.00×10^7/g；N+P_2O_5+K_2O=1.92+2.24+1.12。具体施肥试验设计见表1。

表1 施肥试验设计

Table 1 Fertilization test design

处理	氮磷钾输入量/(kg·hm^{-2})			外源有机碳输入量/(kg·hm^{-2})	
	N	P_2O_5	K_2O	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	1 650	0
T_3	59.4	59.4	59.4	0	1 980
T_4	59.4	59.4	59.4	1 650	1 980

注：①a代表外源碳分别来源于有机肥和生物有机肥的量。②CK为不施肥；T_1为单施化肥；T_2为化肥配施有机肥；T_3为化肥配施生物有机肥；T_4为化肥配施有机肥和生物有机肥。下同。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集

在2022年11月初施肥前进行土壤样品采集，采样范围在每棵核桃树冠投影下三分之二处，距离树干1.5 m左右的范围避开施肥区域，按照“S”型路线，均匀选取5个样点，使用定制的取样环刀（直径为10 cm、高度为10 cm）采集深度为0—40 cm的土样混合，每个小区采集6棵核桃树的原状土按四分法进行充分混合为1个土样。分别用聚乙烯塑料盒装好，做好标记贴上标签。

将所采集的原状土壤沿自然裂隙轻轻掰成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。

1.3.2 植物样品采集

核桃果实样品分别于2020年8月、2022年8月末核桃成熟时采收，每个处理选取6棵长势均一、无病虫害的核桃树作为采样树，在东、南、西、北及内膛和外围随机采集，每株树采集10个果实，将60个果实混合为1个样品，每个处理重复3次。带回实验室后喷洒乙烯利，待核桃果实产生离层时脱去青皮，清洗后干燥保存。

1.3.3 土壤团聚体基本性质测定

土壤团聚体机械稳定性分级：本试验采取干筛法，土样风干后，将500 g土样倒入土壤筛，土筛孔径从上到下依次为5，2，1，0.25，0.053 mm，筛底收集小于0.053 mm的土粒。利用电动摇筛机筛分团聚体，使各个粒级的土粒落在相对应的筛面上，依次得到>5 mm，5～2 mm，2～1 mm，1～0.25 mm，0.25～0.053 mm和<0.053 mm粒级团聚体，即将土壤分为6个不同粒径团聚体，称重并记录。

土壤团聚体氮磷钾测定参考《土壤农化分析》[16]方法进行。

（1）全氮。凯氏消煮法，AA3连续流动分析仪测定；硝态氮和铵态氮：1 mol/L KCl浸提，AA3连续流动分析仪测定。

（2）全磷。NaOH熔融，钼锑抗比色法；速效磷：$NaHCO_3$浸提，钼锑抗比色法。

（3）全钾。NaOH熔融，火焰光度法测定；速效钾：NH_4OAc浸提，火焰光度法测定。

1.3.4 核桃产量品质测定

经济性状指标测定：核桃采收期，从CK，T_1，T_2，T_3，T_4 5个处理的试验树上分别采果，统计各处理单株挂果量、测定总产量（仅产量指标采用2020年所采集果实）。

用电子天平（0.001 g）称单个核仁重（g），计算出干果均重、仁重以及出仁率等。用游标卡尺测量出干果样品的纵径、横径、缝合线径和果壳厚度（mm），计算坚果三径平均值。内在营养指标测定如表2所示。

表2 核桃内在营养指标测定

Table 2 Determination of intrinsic nutritional indicators of walnut

指标	方法
核仁氨基酸总量	GB/T 5009.124—2016《食品中氨基酸的测定》
核仁脂肪酸含量	GB/T 5009.168—2016《食品中脂肪酸的测定》
核仁微量元素	GB 5009.268—2016《食品中多元素的测定》
核仁大量元素	GB 5009.268—2016《食品中多元素的测定》
核仁含油量	索氏提取法测定

1.4　数据处理与分析

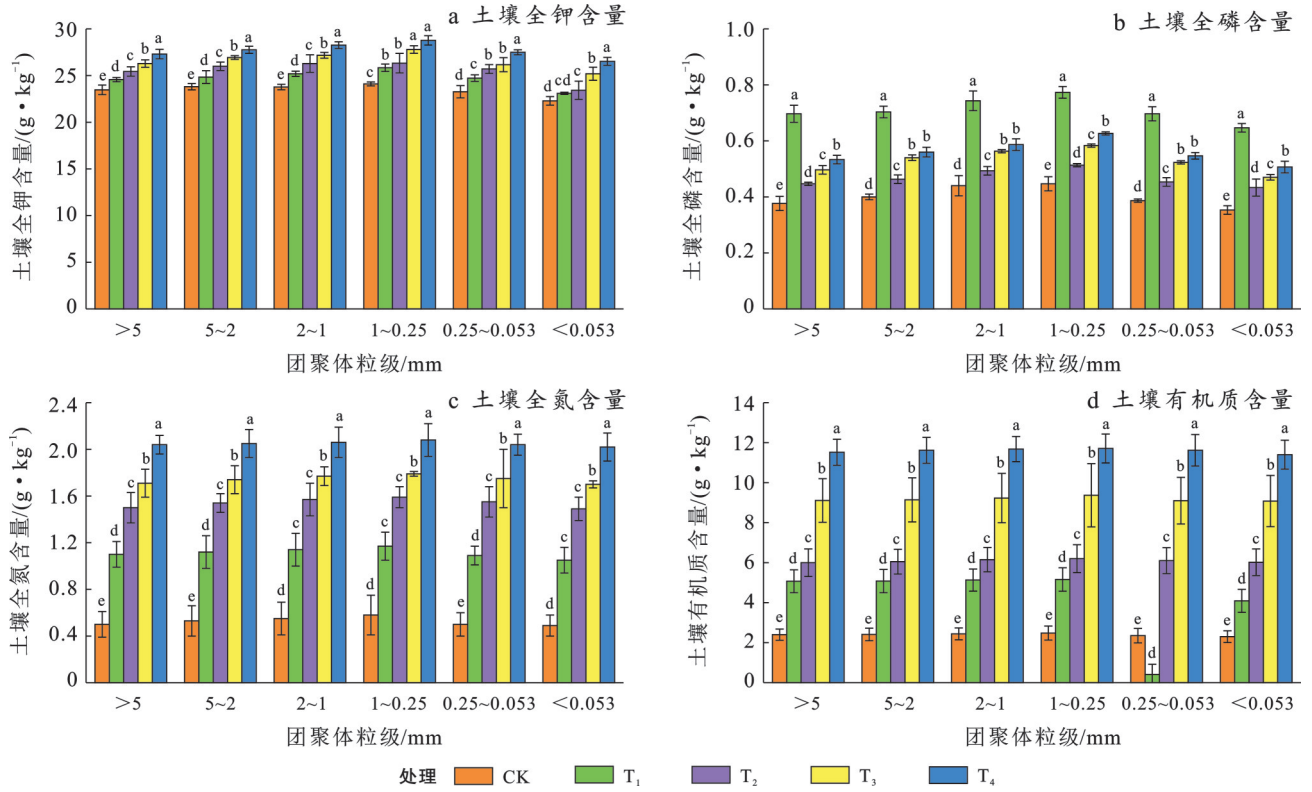
采用 Microsoft Excel 2019 进行数据统计,SPSS 25.0 进行单因素方差和显著性差异分析,采用 Origin 2021 作图。

2　结果与分析

2.1　长期施肥对土壤团聚体主要全量养分含量的影响

由图 1 可看出,施肥显著提升了各粒径土壤团聚体中全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)及有机质(SOM)含量,其中 T_4 处理(化肥+有机肥+生物菌肥)效果最优。

0.25~0.053 mm 的团聚体中不同处理的 TN 含量存在显著性差异,具体为 T_4 分别是 CK, T_1, T_2, T_3 的 4.08, 2.22, 1.32, 1.17 倍。所有处理的 TN 含量均在粒径<0.053 mm 的粉黏性团聚体中相对较低,其中,CK 的 TN 含量最低,为 0.49 g/kg,与 T_4 处理下的粉黏性团聚体相比,TN 含量低了 75.7%。TP 含量在 T_1 处理的 1~0.25 mm 粒径中最高(0.78 g/kg), T_4 在所有粒径中 TP 含量均高于 CK, T_2 和 T_3, 1~0.25 mm 粒径达 0.62 g/kg,较其他粒径高出 7%~22%。TK 在 T_4 处理下的 1~0.25 mm 粒径中最高(28.77 g/kg),为 CK 的 1.19 倍,亦高于 T_1 和 T_2。SOM 方面, T_4 处理显著提高各粒径含量(11.52~11.71 g/kg),其中 1~0.25 mm 粒径最高,为 CK 的 4.72 倍;<0.053 mm 粒径中, T_4 亦表现最优。



注:柱上不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著(p<0.05),下同。

图 1　不同施肥处理下土壤团聚体主要全量养分含量变化

Fig.1　Changes in major total nutrient contents of soil aggregates under different fertilization treatments

2.2　长期施肥对团聚体主要速效养分含量的影响

由图 2 可看出,施肥显著提升了各粒径土壤团聚体中硝态氮(NO_3^--N)、铵态氮(NH_4^+-N)、有效磷(AP)和速效钾(AK)含量,呈现明显的粒径分布规律。

NO_3^--N 含量随施肥强度依次增加(CK<T_1<T_2<T_3<T_4), T_4 处理在各粒径中含量最高,1~0.25 mm 粒径中积累最高,即便在<0.053 mm 粒径中, T_4 仍显著优于 CK。NH_4^+-N 在各粒径中均随施肥强度递增。T_4 处理下 1~0.25 mm 粒径含量最高(6.44 mg/kg),处理间差异显著,表明施肥增强了团聚体对 NH_4^+-N 的富集能力。AP 在 T_1 处理下含量最高,尤其在 1~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 粒径中优势明显。各粒径间 AP 分布趋势为:1~0.25 mm 粒径>2~1 mm 粒径>0.25~0.053 mm 粒径>2~5 mm 粒径>(>5 mm)粒径>(<0.053 mm)粒径。AK 含量随施肥强度依次提升(T_4>T_3>T_2> T_1>CK), T_4 处理在 1~0.25 mm 粒径中最高(247.33 mg/kg),显著优于其他处理。

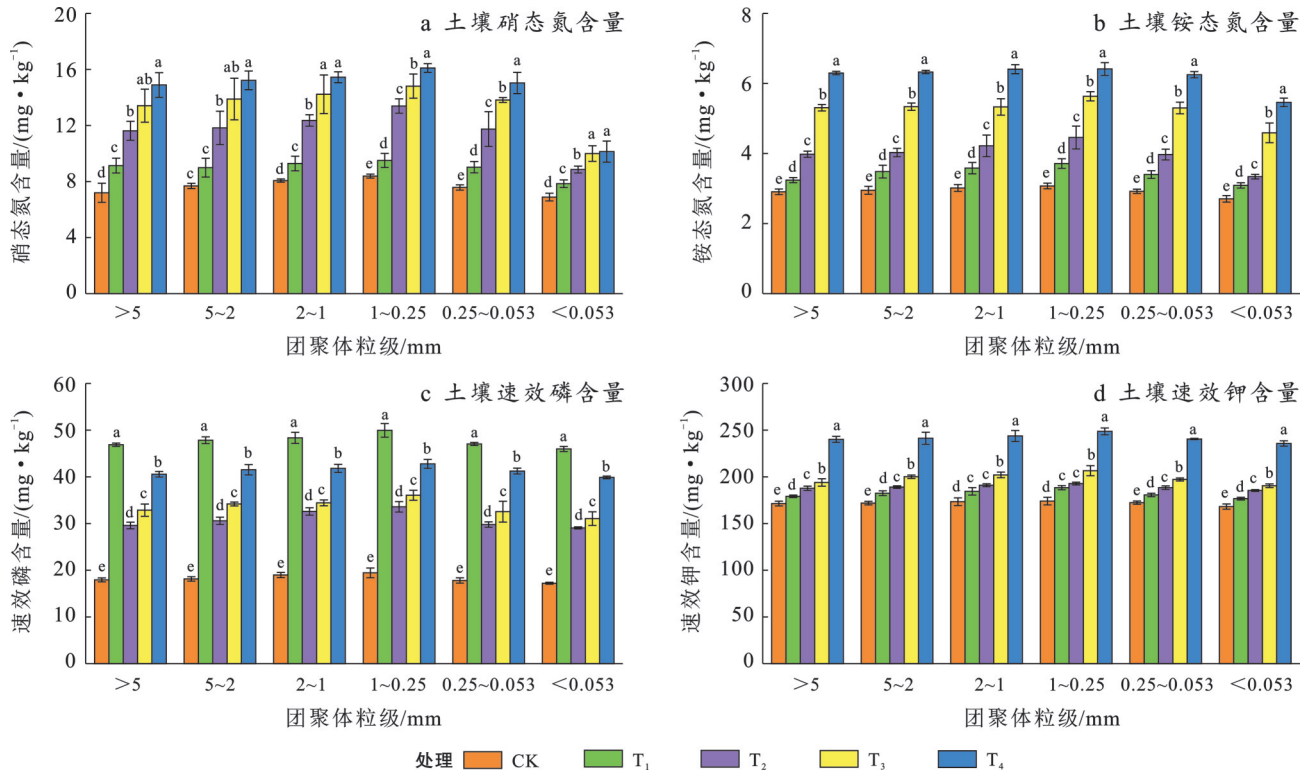


图 2 长期施肥对团聚体主要速效养分含量的影响

Fig.2 Effects of long-term fertilization on major available nutrient contents of soil aggregates

2.3 不同施肥处理对核桃产量的影响

由图 3 可知，不同施肥处理的核桃产量差异显著。其中，T_4处理产量最高，显著优于其他处理。2020 年，T_4产量分别为 CK，T_1，T_2，T_3的 6.23，2.30，1.57，1.14 倍；2022 年，其产量为 CK，T_1，T_2，T_3的 6.5，2.19，1.48，1.15 倍。

2.4 不同施肥处理对核桃果实经济性状的影响

表 3 显示，T_4处理在核桃坚果多个经济性状指标上表现最优：①三径均值最大，为 37.69 mm，较 T_3，T_2，T_1和 CK 分别提升 1.96，2.00，2.59，2.83 mm，即果个最大；②单果干重和仁重均最大，分别为 13.46 g 和 7.59 g，单果干重较 CK 提高 30%；仁重为 CK 的 1.45 倍，且均呈现：T_4>T_3>T_2>T_1>CK 的趋势；③壳厚最小，为 1.30 mm，较 CK 减少 22%；④出仁率最高，较 CK 提高 9%。

2.5 不同施肥处理对果实含油量和脂肪酸的影响

表 4 显示，不同施肥处理核仁含油率有一定差异，整体含油率在 65%～70%。T_4处理含油率最高，为 68.59%，与其他处理均有显著差异；T_1—T_3与 CK 亦存在显著差异，但 3 个处理间差异不显著。

表 3 配施肥对核桃果实经济性状的影响

Table 3 Effects of combined fertilization on economic traits of walnut fruit

处理	三径均值/mm	单果干重/g	仁重/g	壳厚/mm	出仁率/%
CK	34.86±0.45^{b}	10.63±0.85^{c}	5.25±0.58^{c}	1.58±0.18^{a}	44.65±0.05^{d}
T_1	35.10±0.78^{b}	11.58±0.99^{b}	6.09±0.31^{bc}	1.50±0.09^{a}	48.71±0.09^{c}
T_2	35.69±0.15^{b}	12.07±1.01^{b}	6.61±0.89^{b}	1.34±0.10^{b}	52.04±0.11^{b}
T_3	35.73±0.84^{b}	12.89±0.94^{a}	7.15±0.76^{ab}	1.31±0.13^{b}	52.48±0.12^{b}
T_4	37.69±0.24^{a}	13.46±0.92^{a}	7.59±0.86^{a}	1.29±0.09^{b}	53.65±0.78^{a}

在脂肪酸组成方面：①不饱和脂肪酸：T_4显著提高了油酸含量，达 21.52%，为 CK 的 1.23 倍，增幅约 20%；尽管亚油酸与亚麻酸略有下降，总体不饱和脂肪酸水平仍因 T_4配施肥而提升；②饱和脂肪酸：T_4处理下棕榈酸含量略高于 CK，T_1和 T_2，硬脂酸含量分别较 CK，T_1，T_2和 T_3提高 14.45%，4.15%，3.44% 和 2.73%，表明 T_4有助于优化脂肪酸结构；③蛋白质含量：所有施肥处理均显著提高核仁蛋白质含量（均>16%，

$p<0.05$),T_4处理最高,为CK的1.07倍。不同施肥处理的核仁含油率之间存在显著差异,具体可见表4。

2.6　不同施肥处理对核仁氨基酸的影响

表5显示,不同施肥处理对核仁氨基酸含量均产生差异性影响:①氨基酸总量:T_4处理下核仁氨基酸总量最高,达18.89%,为CK的1.11倍,差异显著($p<0.05$)。②天冬氨酸:T_4处理显著提高天冬氨酸含量($p<0.05$),分别为CK,T_1,T_2,T_3的1.12,1.07,1.05,1.05倍,T_4与CK差异极显著。③谷氨酸:T_4处理下谷氨酸含量达3.55%,较CK,T_1,T_2和T_3分别提高8.2%,4.41%,4.71%和4.10%。④脯氨酸:T_4处理显著提升脯氨酸含量(1.45%),较CK(1.28%)增加0.17%($p<0.05$)。⑤甘氨酸与丙氨酸:T_4处理下甘氨酸和丙氨酸含量较CK分别提高13.9%和21.43%。

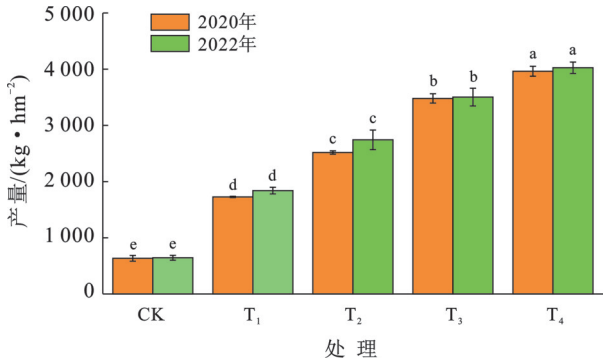


图3　2020年、2022年不同施肥处理下的核桃产量
Fig.3　Walnut yield under different fertilization treatments in 2020 and 2022

表4　不同施肥处理对核桃果实含油量和脂肪酸的影响
Table 4　Effects of different fertilization treatments on walnut oil content and fatty acid composition

处理	含油率/%	棕榈酸/%	硬脂酸/%	油酸/%	亚油酸/%	亚麻酸/%	不饱和脂肪酸/%	蛋白质/%
CK	65.81^{c}	6.59^{ab}	2.63^{a}	17.52^{a}	63.43^{c}	7.82^{a}	91.14^{c}	16.16^{b}
T_1	67.36^{b}	6.64^{b}	2.89^{b}	18.58^{b}	60.05^{a}	8.84^{b}	91.86^{bc}	16.99^{a}
T_2	67.56^{b}	6.53^{a}	2.91^{b}	18.04^{b}	63.28^{c}	8.88^{b}	92.11^{b}	17.18^{a}
T_3	67.71^{b}	6.89^{c}	2.93^{a}	19.68^{c}	61.80^{b}	8.97^{c}	92.43^{b}	17.19^{a}
T_4	68.59^{a}	6.91^{c}	3.01^{c}	21.52^{d}	61.24^{b}	8.78^{bc}	93.47^{a}	17.35^{a}

表5　不同施肥处理对核仁氨基酸的影响
Table 5　Effects of different fertilization treatments on amino acid contents in walnut kernels

氨基酸种类/%	处理				
	CK	T_1	T_2	T_3	T_4
天冬氨酸(Asp)	1.74^{c}	1.83^{b}	1.86^{b}	1.86^{b}	1.95^{a}
苏氨酸(Thr)	0.63^{b}	0.69^{b}	0.70^{b}	0.76^{a}	0.77^{a}
丝氨酸(Ser)	0.90^{c}	0.91^{c}	0.91^{c}	0.94^{b}	0.97^{a}
谷氨酸(Glu)	3.28^{c}	3.40^{b}	3.39^{b}	3.41^{b}	3.55^{a}
脯氨酸(Pro)	1.28^{d}	1.35^{c}	1.37^{c}	1.41^{b}	1.45^{a}
甘氨酸(Gly)	0.79^{c}	0.85^{b}	0.86^{b}	0.84^{b}	0.9^{a}
丙氨酸(Ala)	0.70^{c}	0.78^{b}	0.79^{b}	0.83^{a}	0.85^{a}
胱氨酸(Cys)	0.21^{a}	0.20^{a}	0.21^{a}	0.21^{a}	0.22^{a}
缬氨酸(Val)	0.73^{b}	0.72^{b}	0.77^{a}	0.77^{a}	0.78^{a}
蛋氨酸(Met)	0.19^{a}	0.21^{a}	0.2^{a}	0.19^{a}	0.21^{a}
异亮氨酸(Ile)	0.58^{b}	0.56^{b}	0.58^{b}	0.61^{a}	0.62^{a}
亮氨酸(Leu)	1.29^{b}	1.29^{b}	1.30^{b}	1.35^{a}	1.36^{a}
酪氨酸(Tyr)	0.50^{a}	0.53^{a}	0.51^{a}	0.50^{a}	0.53^{a}
苯丙氨酸(Phe)	0.80^{b}	0.81^{b}	0.87^{a}	0.89^{a}	0.90^{a}
赖氨酸(Lys)	0.47^{a}	0.47^{a}	0.46^{a}	0.48^{a}	0.48^{a}
组氨酸(His)	0.40^{b}	0.42^{a}	0.43^{a}	0.43^{a}	0.45^{a}
精氨酸(Arg)	2.58^{c}	2.73^{b}	2.71^{b}	2.75^{b}	2.90^{a}
总量(Sum)	17.07^{c}	17.75^{b}	17.92^{b}	18.23^{b}	18.89^{a}

2.7　不同施肥处理对核仁矿质元素含量的影响

图4表明,不同施肥处理显著提高核桃果实中P,K,Mn,Fe,Zn和Mg的含量:①T_4处理下P和K含量最高,分别为4 818.9 mg/kg和3 797.8 mg/kg,较CK显著提升5.6%和6.4%。②Mn含量在T_1和T_2处理中显著增加,T_2处理最高,为105.89 mg/kg。③T_4处理Fe含量达34.56 mg/kg,较T_1提高16.4%。④Zn含量在T_2和T_4处理中显著升高,分别较CK高31.4%和29.5%。⑤Mg为含量最高的营养元素,T_4处理达980.45 mg/kg,分别为CK,T_1,T_2,T_3的1.12,1.07,1.05,1.01倍。

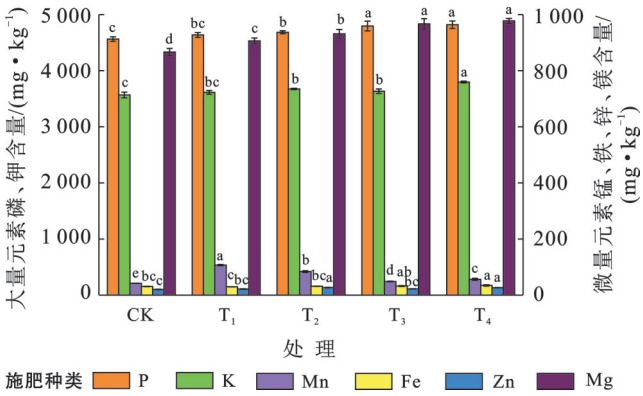


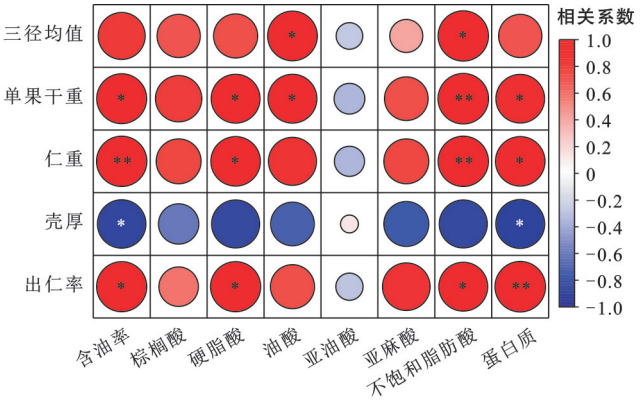
图4　不同施肥处理核仁元素含量
Fig.4　Mineral element contents in walnut kernels under different fertilization treatments

2.8　施肥–土壤团聚体质量–产品品质相关分析

2.8.1　核桃果仁脂肪酸的相关性分析

如图5所示,核仁脂肪酸组成与坚果经济性状之

间存在显著相关性。含油率、硬脂酸、不饱和脂肪酸及蛋白质与出仁率、仁重、单果干重及三径均值均呈正相关($r>0.8$)。油酸与各经济性状间亦表现出显著正相关,棕榈酸和亚麻酸与上述性状亦呈正相关,但相关系数低于0.6,亚麻酸与各经济性状呈现负相关性。综上,核桃的出仁率、仁重、单果干重及三径均值等关键经济性状指标与脂肪酸组成密切相关。



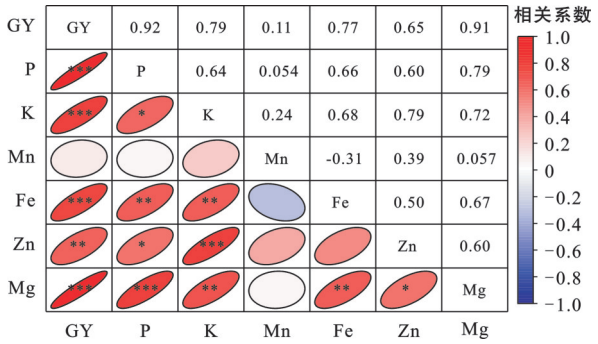
注:*为$p\leqslant0.05$; **为$p\leqslant0.01$; ***为$p\leqslant0.001$。

图5 核仁脂肪酸及经济性状相关性

Fig.5 Correlations between fatty acid composition and economic traits of walnut fruit

2.8.2 核桃果仁微量元素及大量元素与产量相关性分析

由图6可知,①核桃产量与P,K,Fe,Mg含量呈显著正相关,相关系数均超过0.75,尤以与P元素相关性最为显著($r=0.925$)。产量与Zn的相关系数为0.653,Mn与其他元素及产量之间相关性普遍较低($r<0.39$),且与Fe呈负相关($r=-0.315$)。②元素间的相关性表现为Zn与K,Mg与P之间存在较强正相关($r=0.793$和0.795);P与K,Zn与P,Mg与Zn间相关性适中(r分别为0.604,0.645,0.602);Mg与K,Mg与Fe,Fe与P,Fe与K之间亦呈一定程度相关性($r=0.62\sim0.73$)。



注:GY表示核桃果实产量。下同。

图6 核桃果实营养元素及产量相关性

Fig.6 Correlations between nutrient elements and yield of walnut fruit

综上所述,核桃产量与多数矿质元素含量密切相关,尤其与P元素关系最强;但各元素间相关性差异明显。

2.8.3 核仁氨基酸与土壤团聚体速效养分、全量养分的相关性分析

如图7所示,土壤团聚体中各养分指标与氨基酸组成之间存在密切而差异化的联系。氮素指标和有机质与氨基酸的相关性最为广泛和显著,其中TN与SOM和绝大多数氨基酸呈极显著正相关($p<0.001$),NO_3^--N也与部分氨基酸存在显著正相关($p<0.05$)。在氨基酸组分中,天冬氨酸(Asp)、谷氨酸(Glu)、甘氨酸(Gly)和赖氨酸(Lys)等关键氨基酸与氮素、有机质的相关性尤为突出,而蛋氨酸(Met)与酪氨酸(Tyr)则与上述指标无显著相关($p>0.05$)。这一结果表明团聚体中的氮素与有机质是驱动氨基酸合成与积累的核心因子。

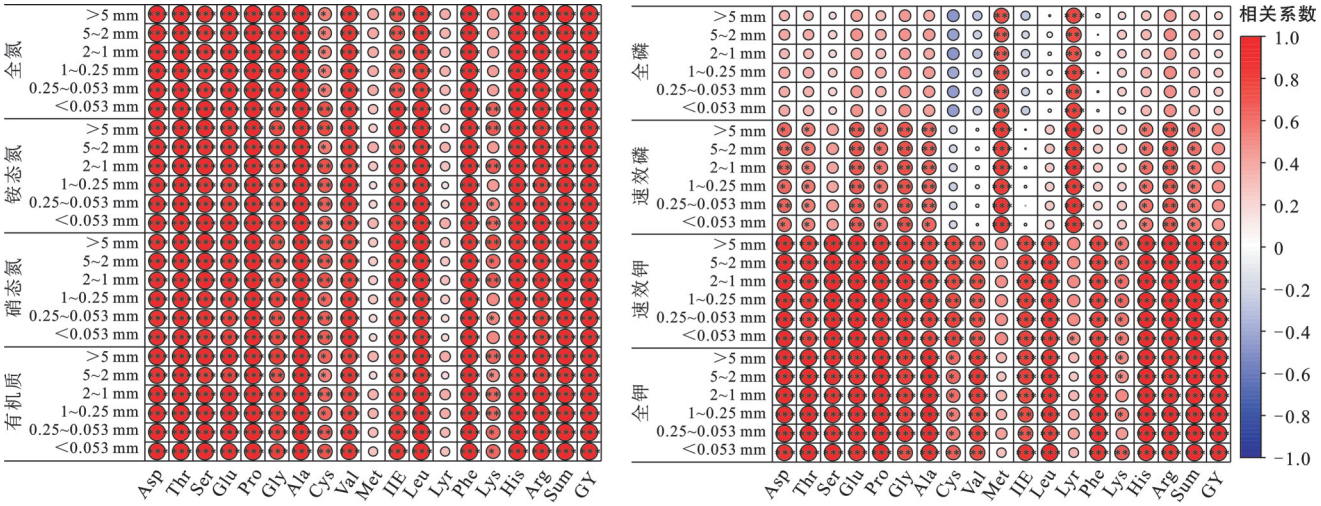


图7 核仁氨基酸与土壤团聚体速效养分、全量养分的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of kernel amino acids with available and total nutrients in soil aggregates

TP与包括天冬氨酸(Asp)、丝氨酸(Ser)等在内的数种氨基酸达到了极显著正相关($p<0.001$),TK也与部分氨基酸呈显著正相关,说明TP, TK水平对氨基酸组成具有重要影响。相比之下,AK与氨基酸的相关性相对较弱,且关联的氨基酸种类较少,反映出AK对氨基酸组成的直接影响力可能较为有限;AP仅与谷氨酸(Glu)、丙氨酸(Ala)等少数氨基酸存在显著正相关($p<0.05$);AK与氨基酸的关联性最弱,表明其对氨基酸组成的直接调控作用有限。

3　讨　论

长期施肥显著提升了不同粒径土壤团聚体中全量养分(全氮TN、全磷TP、全钾TK、有机质SOM)及速效养分(硝态氮NO_3^--N、铵态氮NH_4^+-N、有效磷AP、速效钾AK)的含量。各类养分在1~0.25 mm粒径团聚体中的含量普遍最高,提示该粒径范围是养分富集的关键区域,发挥着重要的土壤肥力调节作用。该养分分布规律与Six等[17]的研究结果高度一致,这说明中等粒径团聚体在维持土壤养分储存及结构稳定性中处于核心地位。

在各施肥处理下,T_4处理显著提高了所有粒径团聚体中的TN, TK和SOM含量,尤以1~0.25 mm粒径团聚体表现最为突出。例如,T_4处理下该粒径团聚体的TN含量达到2.18 g/kg,较对照组(CK)提升约190.67%,表明复合施肥促进了养分的持续供应与有效积累。TP含量在T_1处理(单一化肥)下略优,可能因化肥中磷素易被土壤固定,显示了磷素供给形式对其在团聚体中分布的显著影响[18]。1~0.25 mm团聚体中T_4处理SOM含量最高,为CK的4.72倍,原因可能是:①生物有机肥的施用直接补充果树生长发育必需的有效养分,提高了有机质输入;②混合施肥通过促进土壤大团聚体内的微团聚体形成,从而调控了养分释放的强度与速率,进一步增强了有机质的积累。

速效养分方面,T_4处理显著促进了NO_3^--N和AK的积累,且含量随施肥强度递增。AP在T_1处理下表现较佳,提示过量有机肥施用可能导致磷元素缓释或被微生物固定,从而暂时降低其有效性,此现象亟需进一步探讨其释放机制。总体而言,T_4处理通过改善土壤结构与微生态环境,增强了团聚体对养分的固定与缓释能力,有效保障了养分供应的稳定性与持续性。

已有研究指出,科学的施肥管理能够显著提高作物产量与品质[19],其中化肥与有机肥的合理配施对玉米等作物增产效果明显[20]。本研究中,各施肥处理(T_1, T_2, T_3, T_4)在核桃产量及品质方面均显著高于对照组(CK),且产量随施肥年限增加呈持续增长趋势。增产机制可能包括两方面:一是施用生物有机肥提高了土壤微生物活性,促进有机质分解与养分转化,使生育期的果树最大程度上吸收利用矿质养分,从而增加了核桃产量;二是土壤有机质含量上升加速土壤团聚体固氮、硫化、氧化等过程,促使土壤中难溶性养分的释放,增加土壤有效养分含量,为核桃树生长提供更全面的营养支持。杨瑞平等[21]研究也表明,羊厩肥与化肥配施可显著促进马铃薯干物质积累,实现增产。

在果实品质方面,T_4与T_2处理表现尤为突出。T_4处理下核仁的磷、钾含量最高,铁含量达34.56 mg/kg;T_1与T_2处理则显著提高了锰含量,而T_2与T_4处理显著增加了锌含量。施肥处理普遍提高了核仁中矿质元素的含量,这一结果与张倩[22]的研究结论一致。在物理性状与营养品质方面,T_2, T_3和T_4处理均表现出显著改善作用。具体表现为三径均值、单果干重和仁重增加,壳厚减小,出仁率与含油率提高,蛋白质和总氨基酸含量上升,从而有效优化了坚果的商品性与食用品质[23]。核仁中不饱和脂肪酸与必需氨基酸含量是评价其营养价值的关键指标。本研究中,T_2, T_3和T_4处理均能显著提高不饱和脂肪酸总量,同时降低油酸比例,增加亚油酸和亚麻酸含量,该趋势与卢璐等[24]的报道一致。这一结果可能与施肥改善土壤理化性质(如养分有效性)有关,从而在果树关键生育阶段提供更为均衡的矿质营养,促进核仁中微量元素积累与油脂品质形成,最终综合提升坚果的物理性状与营养品质。

唐敏等[25]提出蛋白质含量、单果质量、磷含量、出仁率及产量为核桃品质评价的关键指标;时羽杰等[26]则强调壳厚、三径、硬脂酸与亚麻酸含量为主要因子。本研究选取的营养成分、产量及相关品质指标均涵盖上述关键评价要素。T_4处理在多项指标中表现最优,说明持续的养分供应与微生态环境改善有助于促进树体健康与果实充分发育,综合提升核桃的经济与营养价值。

核桃的经济性状、营养元素及土壤养分之间存在复杂的相互作用网络。研究表明,核仁脂肪酸组成与关键经济性状(如出仁率、仁重等)呈显著正相关[27],其中含油率与仁重的相关性最强($r=0.935$),而不饱和脂肪酸和蛋白质的高含量可能直接促进果实品质提升。核桃产量与矿质元素(如P, K, Fe, Mg)显著正相关,尤其是P元素($r=0.925$)。

团聚体中TN和SOM与大部分氨基酸呈极显著

正相关($p<0.001$),说明土壤TN和SOM的积累对氨基酸的组成与分布具有重要影响。AN和AK也与部分氨基酸存在显著正相关($p<0.05$),表明土壤中速效养分的有效性也在一定程度上参与调控氨基酸的代谢与转化过程;AP与少数关键氨基酸(如谷氨酸Glu、丙氨酸Ala)存在显著正相关($p<0.05$),说明土壤中易被利用的磷素可能直接参与了这些特定氨基酸的代谢途径或对产生这些氨基酸的微生物活性有促进作用。中大团聚体(>0.25 mm)中的养分和氨基酸相关性普遍高于微团聚体,暗示大团聚体在养分和氨基酸的固持与稳定中可能发挥更为关键的作用

4 结 论

不同施肥处理可显著提升核桃园土壤团聚体养分及果实产量与品质,其中1~0.25 mm粒级团聚体养分含量最高,且土壤团聚体养分、果实营养元素与产量及经济性状间呈显著正相关。化肥、有机肥与生物有机肥配施(T_4)模式在提升土壤养分承载能力、果实产量品质及经济效益方面表现最优,建议作为核桃园优先养分管理方案,以实现土壤质量与果实经济性状协同提升、提质增产持续高效的目标。

参考文献(References)

[1] 张有林,原双进,王小纪,等.基于中国核桃发展战略的核桃加工业的分析与思考[J].农业工程学报,2015,31(21):1-8.
Zhang Youlin, Yuan Shuangjin, Wang Xiaoji, et al. Analysis and reflection on development strategy of walnut processing industry in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(21):1-8.

[2] 李敏,刘媛,孙翠,等.核桃营养价值研究进展[J].中国粮油学报,2009,24(6):166-170.
Li Min, Liu Yuan, Sun Cui, et al. Research advance about nutrients and medicinal value of walnut [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(6):166-170.

[3] 陈勤,李磊珂,吴耀.核桃仁的成分与药理研究进展[J].安徽大学学报(自然科学版),2005,29(1):86-89.
Chen Qin, Li Leike, Wu Yao. Progress of research on the chemical components and pharmaceutical action of walnut kernel [J]. Journal of Anhui University (Natural Sciences), 2005,29(1):86-89.

[4] 周鹏飞,杨永兴,汪海,等.'清香'核桃油脂肪酸组成分析及对高血脂型血管结构的改善作用[J].中国林副特产,2022(3):12-14.
Zhou Pengfei, Yang Yongxing, Wang Hai, et al. Analysis of fatty acid composition of 'Qingxiang' Walnut oil and its improvement effect on hyperlipidemic vascular structure [J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2022(3):12-14.

[5] 郗荣庭.中国核桃(*Juglans regiaL.*)的起源考证[J].河北农业大学学报,1990,13(1):89-94.
Xi Rongting. Textural criticism of walnut (*Juglans regia* L.) origin in China [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 1990,13(1):89-94.

[6] 段凯,秦宝雅.商洛核桃产业发展现状[J].农业工程,2020,10(5):121-124.
Duan Kai, Qin Baoya. Development status of Shangluo walnut industry [J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(5):121-124.

[7] 张海燕,汪海,任志勇,等.核桃配方专用肥对核桃树产量及坚果品质的影响[J].经济林研究,2020,38(3):127-135.
Zhang Haiyan, Wang Hai, Ren Zhiyong, et al. Effects of special fertilizer for walnut on yield and nut quality of walnut tree [J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(3):127-135.

[8] Liu Zhe, Guo Qiao, Feng Zhaoyang, et al. Long-term organic fertilization improves the productivity of kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.) through increasing rhizosphere microbial diversity and network complexity [J]. Applied Soil Ecology, 2020,147:103426.

[9] 龚湲棐,玉素甫江·玉素音,李炳浩,等.增施生物有机肥对库尔勒香梨园土壤养分、果实品质及产量的影响[J].新疆农业大学学报,2023,46(2):131-138.
Gong Yuanfei, Yusufujiang Yusuyin, Li Binghao, et al. Effects of increased application of bio-organic fertilizer on soil nutrients, fruit quality and yield in Korla fragrant pear orchard [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2023,46(2):131-138.

[10] 张博勇,刘杜玲,彭少兵,等.配方施肥对早实核桃品种辽核4号蛋白质和脂肪含量影响的研究[J].西北林学院学报,2018,33(4):120-123.
Zhang Boyong, Liu Duling, Peng Shaobing, et al. Effects of NPK fertilizers on the content of total protein and fat to precocious *Juglans regia* 'LiaoHe 4' [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018,33(4):120-123.

[11] Min Anmin, Zheng, Fanrong, Zhang Li, et al. Effect of fertilizer application on the yield of walnut (*Juglans regia* L.) [J]. Agriculture Biotechnology, 2019,8(2), 142-145.

[12] 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 Shugang, Gao Yi, Gao Xiyu, et al. Effects on yield and quality of different fertilization treatments in

'Qingxiang' walnut [J]. Northern Horticulture, 2019(23):42-47.

[13] 周媛,谭启玲,胡承孝,等.有机无机专用复合肥对葡萄产量、品质和养分利用的影响[J].中国土壤与肥料,2015(6):82-86.
Zhou Yuan, Tan Qiling, Hu Chengxiao, et al. Effects of organic-inorganic special compound fertilizer on yield, quality and nutrient uptake of grape (*Vitis labruscana* Kyoho) [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(6):82-86.

[14] Mazzon M, Cavani L, Margon A, et al. Changes in soil phenol oxidase activities due to long-term application of compost and mineral N in a walnut orchard [J]. Geoderma, 2018,316:70-77.

[15] 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.
Huang Xiaohui, Feng Dalan, Yang Huajun, 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.

[16] 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.

[17] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000,32(14):2099-2103.

[18] 邢旭明,王红梅,安婷婷,等.长期施肥对棕壤团聚体组成及其主要养分赋存的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):267-273.
Xing Xuming, Wang Hongmei, An Tingting, et al. Effects of long-term fertilization on distribution of aggregate size and main nutrient accumulation in brown earth [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(2):267-273.

[19] 杨贵川,陈品文,吴小平,等.测土配方施肥对葡萄土壤肥力及果实品质的影响[J].中国南方果树,2019,48(6):125-130.
Yang Guichuan, Chen Pinwen, Wu Xiaoping, et al. Effects of soil testing and formulated fertilization on soil fertility and fruit quality of grapes [J]. South China Fruits, 2019,48(6):125-130.

[20] 谢钧宇,张慧芳,罗云琪,等.连续7年施有机肥和化肥提高复垦土壤上玉米产量的驱动因子[J].农业工程学报,2024,40(1):150-160.
Xie Junyu, Zhang Huifang, Luo Yunqi, et al. Driving factors of improving maize yields in the reclaimed soils by seven years of applied organic manure and chemical fertilizer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024,40(1),150-160.

[21] 杨瑞平,张胜,高翔,等.羊厩肥与氮磷化肥配施对马铃薯干物质积累及产量的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2011,32(1):63-67.
Yang Ruiping, Zhang Sheng, Gao Xiang, et al. The effects of stable manure and np fertilizer on accumulation dry matter and yield of potato [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2011,32(1):63-67.

[22] 张倩.不同施肥处理对土壤生物学特性及核桃产量品质的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
Zhang Qian. Effects of different fertilization treatments on soil biological characteristics and walnut yield quality [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.

[23] 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 Haiyun. Effects of long-term fertilization on walnut quality and rhizosphere soil microbial and enzyme activities [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.

[24] 卢璐.陕西核桃产区土壤肥力与坚果品质的相关性[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
Lu Lu. Correlation between soil fertility and nut quality in Shaanxi walnut producing areas [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.

[25] 唐敏,刘紫烟,陈利英,等.河北太行山区15个核桃品种性状综合评价[J].西北林学院学报,2022,37(1):137-144.
Tang Min, Liu Ziyan, Chen Liying, et al. Comprehensive evaluation on the characters of 15 walnut cultivars in the Taihang Mountains of Hebei Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1):137-144.

[26] 时羽杰,李晶晶,糜加轩,等.川西不同产地"盐源早"核桃的品质研究及评价[J].四川农业大学学报,2021,39(4):486-495.
Shi Yujie, Li Jingjing, Mi Jiaxuan, et al. Study and evaluation on the quality of 'Yanyuanzao' walnut from different producing areas in western Sichuan [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(4):486-495.

[27] 闵安民,王勇,莫开林,等.肥料配合施用对核桃产量的影响[J].四川林业科技,2018,39(2):18-22.
Min Anmin, Wang Yong, Mo Kailin, et al. Effects of fertilizer application on the yield of *Juglans regia* L [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2018,39(2):18-22.