果　树　学　报　2025，42（8）：1773-1785
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250127

连作及间作黄芩对核桃苗生长及土壤化学性质的影响

谢佳怡[1]，韦长江[1]，徐海根[1]，宋　健[2]，齐建勋[3]，张赟齐[3]，翟长远[2*]，侯智霞[1*]

（[1]林木资源高效生产国家重点实验室·蓝莓研究与发展中心·北京林业大学，北京 100083；
[2]北京市农林科学院智能装备技术研究中心，北京 100097；
[3]北京市农林科学院林业果树研究所·北京市落叶果树工程技术研究中心，北京 100093）

摘　要：【目的】探究核桃苗在连作土壤中的生长表现及矿质营养特性，以及间作黄芩对核桃苗生长和土壤性质的影响。**【方法】**通过盆栽试验，以种植17 a（年）核桃的土壤"核桃土"和未种植核桃的"普通土"为基质，设置4个处理：核桃土-核桃单作、普通土-核桃单作、核桃土-核桃-黄芩间作、普通土-核桃-黄芩间作。**【结果】**（1）栽培前的核桃土壤钙、有效磷、速效钾含量及电导率显著低于普通土，锰、有机质含量显著高于普通土。（2）核桃土中核桃苗生长指标包括株高、地径、生物量、叶面积、分枝数低于普通土，对磷、钾的富集量降低，叶片钾含量显著低于普通土，锰含量较高。（3）间作提升了土壤有效磷、有机质含量及磷酸酶活性，提高核桃对氮、磷、钙的富集量和根部氮、磷的含量。**【结论】**连作导致核桃土壤有效态养分失衡、锰含量增加，使连作土壤中核桃叶片的钾含量降低、锰含量增加，植株生长受到抑制。间作均可改善土壤化学性质，促进核桃苗对养分的吸收，具有重要的农业生产意义。

关键词：核桃；连作障碍；黄芩；间作；矿质营养；土壤化学性质

中图分类号：S664.1　　　**文献标志码：**A　　　**文章编号：**1009-9980(2025)08-1773-13

The impact of continuous cropping and intercropping of *Scutellaria baicalensis* on the growth of walnut seedlings and soil chemical properties

XIE Jiayi[1], WEI Changjiang[1], XU Haigen[1], SONG Jian[2], QI Jianxun[3], ZHANG Yunqi[3], ZHAI Changyuan[2*], HOU Zhixia[1*]

([1]National Key Laboratory of Efficient Production of Forest Tree Resources/Blueberry Research and Development Center/Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; [2]Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; [3]Institute of Forestry and Fruit Trees, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Beijing Deciduous Fruit Tree Engineering Technology Research Center, Beijing 100093, China)

Abstract:【Objective】Continuous cropping has a noticeable inhibitory effect on many crops, resulting in autotoxicity. There are few reports on whether walnut (*Juglans regia* L.) cultivation experiences continuous cropping obstacles. The study aimed to clarify the growth performance and mineral nutrient characteristics of walnut seedlings in continuously cropped soil, as well as the impact of intercropping walnut with scutellaria on its growth and soil properties in order to provide references for alleviating continuous cropping obstacles in walnuts and optimizing intercropping models.【Methods】This study employed a pot experiment using soil from a walnut grove where the walnut had been cultivated for 17 years (walnut soil) and soil from the same forest where the walnut had never been cultivated (regular soil) as the substrate. Four treatments were established: walnut soil-walnut sole cropping (HD), regular soil-walnut sole cropping (PD), walnut soil-walnut-scutellaria (*Scutellaria baicalensis*) intercropping (HJ), and regular soil-walnut-scutellaria intercropping (PJ).【Results】(1) Before planting, there were

收稿日期：2025-03-07　　**接受日期：**2025-04-19

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD1000102）；北京林业大学热点追踪项目（2022BLRD07）

作者简介：谢佳怡，女，在读硕士研究生，研究方向为林下经济。E-mail：xiejiayi06@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail：zhaicy@nercita.org.cn；E-mail：hzxn2004@163.com

no significant differences between the two soil types in terms of total nitrogen, total phosphorus, total potassium, magnesium, copper, ammonium nitrogen, and pH value. However, the calcium, available phosphorus, quick-acting potassium, and electrical conductivity in the walnut soil were significantly lower than those in the regular soil, while the manganese content and organic matter content in the walnut soil were significantly higher than those in the regular soil. The correlation analysis showed that the available phosphorus in the soil was significantly and positively correlated with the relative chlorophyll content of the walnut leaves, and significantly and negatively correlated with the manganese content in the walnut roots. The quick-acting potassium in the soil was significantly and positively correlated with the number of branches of the walnut trees and extremely significantly and positively correlated with the leaf area, with an *r* value of 0.997 4. The manganese content in the walnut roots was significantly and negatively correlated with the plant height and ground diameter, and extremely significantly and negatively correlated with the relative chlorophyll content of the leaves. It would be possible that the imbalance of available elements and the accumulation of manganese might be limiting factors for the growth of walnut under continuous planting. (2) Under the walnut soil treatment, the height, ground diameter, biomass, leaf area, number of branches, and relative chlorophyll content of the walnut seedlings were all significantly lower than those under the regular soil treatment, the walnut soil would reduce the walnut's ability to accumulate nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium. The continuous planting caused lower level of the potassium content in the walnut leaves than the regular soil. The correlation analysis showed that the potassium content in the walnut leaves was significantly and positively correlated with the and plant height, ground diameter, leaf area, and quick-acting potassium, and extremely significantly positively correlated with the number of branches, with an r value of 0.995 6. The continuous cropping led to an imbalance in the available potassium in the walnut soil, which reduced the leaf absorption of potassium, thus limiting the development of the walnut. After four months of planting, the total nitrogen, total phosphorus, calcium, and organic matter content in the regular soil were lower than those in walnut soil, while the available phosphorus and quick-acting potassium content were significantly higher. (3) The intercropping walnut with *Scutellaria baicalensis* had a certain promoting effect on the walnut seedling growth. The intercropping significantly increased the nitrogen, phosphorus, and calcium content and accumulation in the walnut roots, while reducing the accumulation of the magnesium, copper, and manganese. It also significantly increased the levels of the available phosphorus, organic matter, and alkaline phosphatase activity in the soil. The soil alkaline phosphatase activity was extremely significantly and positively correlated with the nitrogen and phosphorus content in the walnut roots, indicating that the increase in the soil alkaline phosphatase activity under intercropping also enhanced the walnut roots' ability to absorb nitrogen and phosphorus. The intercropping also improved the activity of the sucrase, which was significantly and positively correlated with the calcium content in the walnut roots, indirectly affecting the calcium absorption by the roots. The improvement of the soil enzyme activity promoted the accumulation of nitrogen, phosphorus, and calcium in the walnut roots and reduced the manganese and copper content in the walnut seedlings and roots. 【Conclusion】In the soil where the walnut had been continuously planted for 17 years, the growth and nutrient absorption of the walnut seedlings were inhibited, as evidenced by the significant reductions in the plant height, trunk diameter, biomass, leaf area, and branch number. The continuous planting resulted in a decrease in the available phosphorus, available potassium, and electrical conductivity in the soil, and increase in the manganese content. This significantly affected the potassium absorption capacity of the walnut leaves, leading to an increase in manganese accumulation and calcium content in the leaves. The intercropping significantly enhanced the levels of the available phosphorus, organic matter, soil pH, and alkaline phosphatase activity in the soil, improving the nitrogen, phosphorus, and calcium content and enrichment in the walnut roots, while reducing manganese content in the walnuts and copper content in the roots. Therefore, the intercropping management may provide a more favorable soil environment for the healthy growth and nutrient absorption of the walnut seedlings. The study would offer a practical reference for the intercropping model of walnuts and *S. baicalensis*.

Key words: Walnut; Continuous cropping obstacles; *Scutellaria baicalensis*; Intercropping; Mineral nutrition; Soil chemical properties

核桃（*Juglans regia* L.）是中国重要的干果树种，适应性强，种植面积大，在全球核桃生产中也占有重要地位[1]。但是，因为一些品种如早实核桃的盛果期仅20 a（年）[2]，所以中国大面积的核桃园已进入结果后期，面临品种更新、老园改造等问题[3]。核桃作为典型的化感树种[4]，叶[5]、青皮[6]、根系[7]等会抑制苜蓿、辣椒等植物的正常发育。核桃老园重建是否会存在连作障碍、连作障碍的机制和化解措施等问题均有待研究。

同一地块上连续种植同类植物造成后栽的植株出现树势衰弱、生长受抑、果实产量下降、品质劣化等一系列不良现象，即为连作障碍[8]。连作障碍是农林业生产中普遍存在的问题，通常认为，它是由土壤理化性质变化、养分失衡、病原体积累以及植物化感作用等多种因素的相互作用造成的[9]。苹果连作导致土壤有害真菌如镰孢菌属（*Fusarium*）等病原菌大量繁殖[10]；辣椒连作影响了土壤养分的平衡[11]；烤烟连作降低了土壤有机质、全碳的含量和pH值[12]；北沙参连作则导致土壤中全氮和有机质含量增加，全磷和全钾含量变化较小[13]；在老龄核桃园，土壤中的酚酸及其混合溶液抑制了苹果幼苗生长[14]，桃、梨等果树也存在较严重的连作障碍现象[15]。

农林业生产中多通过轮作、间作等复合种植的方式克服连作障碍[16]。不同作物根系间的相互作用能够显著改善土壤理化性质[17]、调节根系分泌特性[18]，并影响土壤微生物生理特性[19]等，从而减轻连作障碍的危害。核桃与大豆或花生间作显著提高核桃株高和干径[20]，与毛豌紫云英间作促进土壤微生物的氮循环和碳水化合物的代谢潜力[21]，与茶树间作能显著提高土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量和蔗糖酶活性[22]。以上研究为核桃林地的土壤改良提供了重要参考。

黄芩（*Scutellaria baicalensis*）作为中国常用的药材，具有抗病毒、抗菌、清热解毒等多种药理作用[23]，市场需求量大，品质要求高。林药模式已成为生产高品质药材的重要方式。黄芩耐阴性较强，是中国三北地区林药模式配置中的重要药用植物。核桃林下间种黄芩在生产上已有实践[24-25]，但是间作黄芩能否成为化解核桃连作障碍问题的有效途径值得进一步探索。

由此，笔者旨在通过对比核桃苗在连续栽植17 a核桃的核桃园土壤和未栽植过核桃的普通土壤中的生长差异，分析是否存在连作障碍，并通过比较核桃单作与核桃黄芩间作模式下植株和土壤性质的变化，探讨连作障碍的成因及间作模式缓解连作障碍的潜力，为生产中克服连作障碍提供有益参考。

1　材料和方法

1.1　试验材料

本研究所用的核桃苗为温185实生苗，黄芩种子为河北种源，千粒质量1.59 g。于2023年4月在北京东郊的核桃科研基地（116°56′ E，40°4′ N），采集已栽植17 a核桃的林地土壤作为连作土壤（简称“核桃土”），以基地未种植过核桃的土壤作为对照（简称“普通土”）。每种土壤类型分别选取5个采样点，距核桃树主干1.5~2.0 m范围内，采集从地表至地下30 cm深度范围内的整个土层，采集后将各点土壤样品过筛并充分混合。

1.2　试验设计

本研究于北京市海淀区三倾园试验苗圃（116° 19′ E，40°01′ N）进行。核桃、黄芩种子萌发后选取长势一致的幼苗，6月底栽植于30 cm × 36 cm育苗盆中。设置4个处理：核桃土-核桃单作（HD）、普通土-核桃单作（PD）、核桃土-核桃-黄芩间作（HJ）、普通土-核桃-黄芩间作（PJ）。单作处理为每个盆1株核桃苗；间作处理为每个盆1株核桃苗和4株黄芩苗。

每个处理设置30盆，每10盆为1个重复。栽植后每月进行一次株高和地径测量（共4次），于生长季末（11月）采集核桃的根、茎、叶样本，以及每盆土样。

1.3 测定方法

使用千分之一天平测量生物量；使用叶面积扫描仪（CID-203，America）测量叶面积；使用叶绿素仪（SPAD-502 Plus，Japan）测定叶绿素相对含量；土壤理化性质、养分含量及植物矿质元素的测定采用鲍士旦[26]的土壤农化分析法。采用电位法测定土壤pH；采用电极法测定电导率（EC）；样品消解后使用AA3型连续流动分析仪（SEAL Analytical，German）测定全氮（TN）、全磷（TP）含量。采用原子吸收分光光度法测定全钾（TK）、钙（Ca）、镁（Mg）、铜（Cu）、锰（Mn）含量；采用靛酚蓝比色法测定铵态氮（NH_4^+-N）含量；采用钼锑抗比色法测定有效磷（AP）含量；采用火焰光度计法测定速效钾（AK）含量；采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质（SOM）含量；土壤中脱氢酶（S-DHA）、脲酶（S-UE）、蔗糖酶（S-SC）和碱性磷酸酶（S-ALP）活性均使用北京盒子生工科技有限公司提供的酶活检测试剂盒进行测定。采用公式计算富集系数[27]：

富集系数=植物矿质元素含量/相应土壤中矿质元素含量。

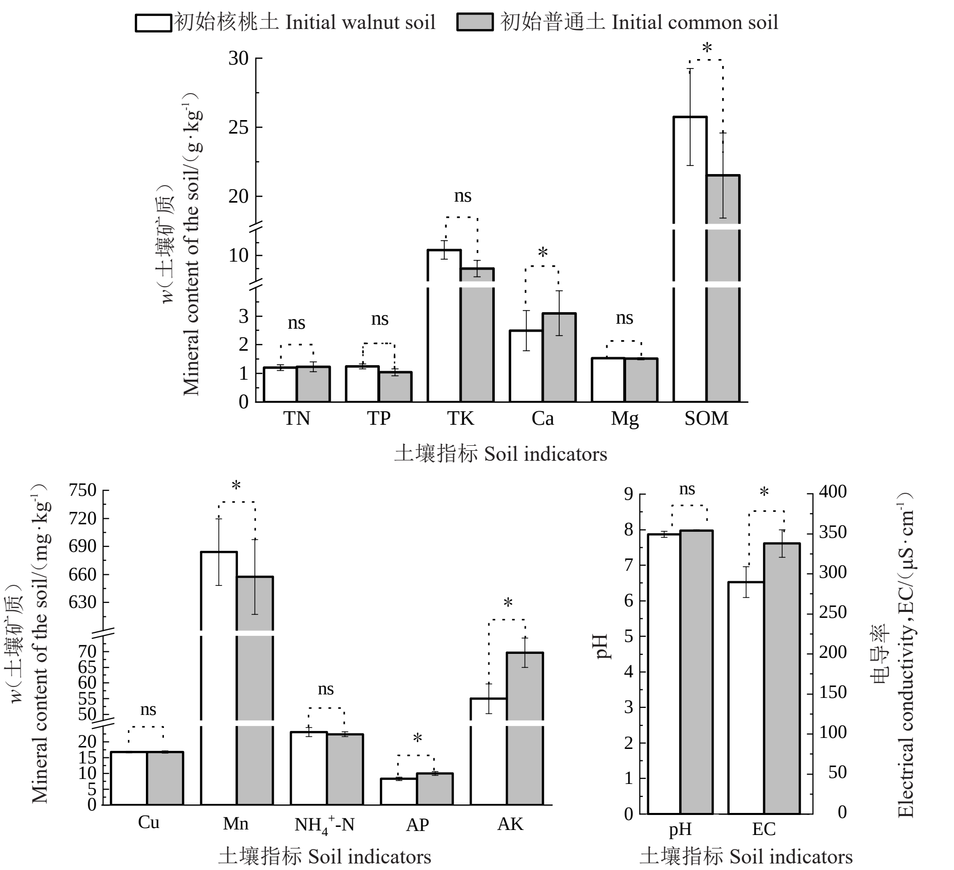
1.4 数据采集与处理

使用Microsoft Excel整理数据，使用SPSS 23.0软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），两组单独样本组用*t*检验。不同的小写字母表示不同处理之间存在显著差异（$P<0.05$）。图形绘制则使用Origin 24以及R 4.2.2版本软件完成。图中数据均标记为平均值（mean）±标准误差（$s_{\bar{x}}$）。

2 结果与分析

2.1 栽植前的核桃土与普通土化学性质差异

如图1所示，在未种植前，两种土壤的全氮、全磷、全钾、镁、铜、铵态氮含量及pH值差异均不显著。核桃土壤的钙、有效磷、速效钾含量以及电导率均显



*表示两者间存在显著差异（$P<0.05$），ns 表示两者间无显著差异（$P>0.05$）。

* indicates a significant difference between the two ($P<0.05$), while ns indicates no significant difference ($P>0.05$).

图1 初始核桃土和初始普通土化学性质差异性比较

Fig. 1 Comparison of the chemical properties between walnut soil and ordinary soil

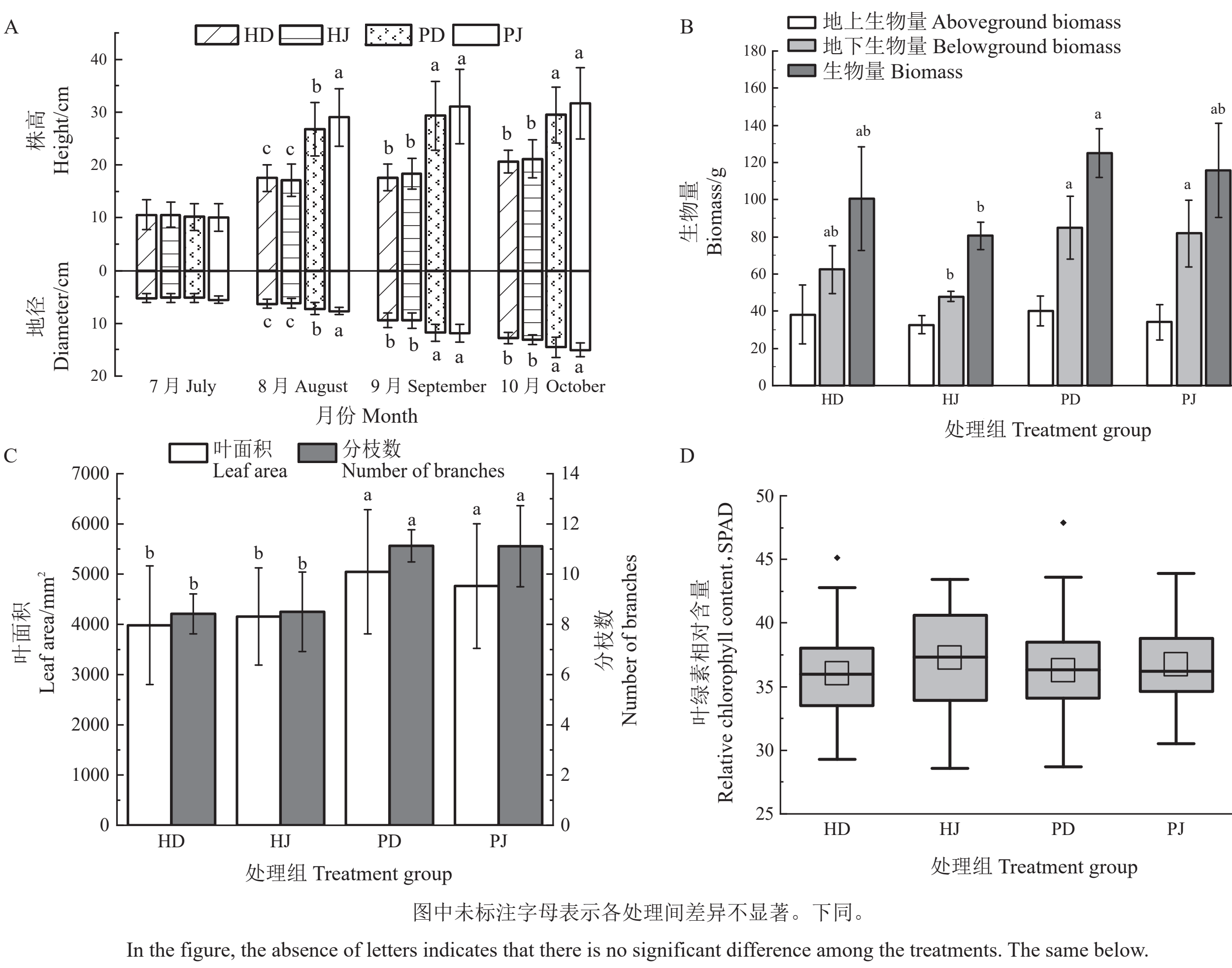
著低于普通土壤，分别降低了19.45%、17.07%、21.13%和14.26%。核桃土壤中的锰含量和有机质含量显著高于普通土壤，分别增加了3.89%、16.44%。

2.2　土壤类型和栽植方式对核桃苗生长的影响

图2-A可知，栽植后第1个月组间株高、地径差异均不显著；后续3次测量，普通土的核桃株高和地径均显著高于核桃土，具体而言，PD株高和地径分别显著高出HD处理34.52%、39.87%、30.02%和11.91%、19.83%、9.16%；PJ高出HJ处理41.07%、41.00%、33.28%和19.37%、20.42%、17.78%。栽植后第2个月PJ株高、地径显著高于PD处理7.68%、6.18%。如图2-B~D显示，PD核桃总生物量和地下生物量较HD处理增加了19.58%、26.49%；PJ较HJ处理增加了30.49%、41.41%。PD、PJ核桃叶面积分别比HD、HJ显著增加了21.11%和12.73%，分枝数显著增加了24.34%、23.50%。叶绿素相对含量在各处理间均无显著差异。图3展示了栽植4个月后的核桃苗，核桃土处理下核桃苗植株较小，但间作下长势相对较好。

2.3　土壤类型和栽植方式对核桃苗矿质营养的影响

两种土壤和单、间作栽植方式对核桃矿质含量影响存在差异。两组间作处理HJ、PJ根部氮含量均较单作HD、PD分别显著高出43.60%、28.11%，磷含量显著高出42.05%、31.80%（图4-A、B）。PD、PJ叶的钾含量分别显著高于HD、HJ处理34.14%、28.07%；HD、PD根的钾含量较HJ、PJ显著提高15.89%、11.38%。HJ根部钙含量显著高出HD、PD、PJ处理25.43%、28.91%、27.12%；HD、HJ叶的钙含量分别高于PD、PJ处理24.03%、6.28%（图4-D）。HD、PD根和茎的镁含量分别高于HJ、PJ处理18.94%、10.18%和10.70%、12.07%（图4-E）。HD、PD根部的铜含量分别显著高出HJ、PJ处理19.57%、16.21%（图4-F）。HD、HJ根、茎的锰含量分别高于PD、PJ处理22.56%、3.74%；30.84%、22.92%，HD叶的锰含量显著高于PD处理22.92%；HD、PD根、茎



图中未标注字母表示各处理间差异不显著。下同。

In the figure, the absence of letters indicates that there is no significant difference among the treatments. The same below.

图2　四种处理对核桃苗生长的影响

Fig. 2　The effects of the four treatments on the growth of walnut seedlings

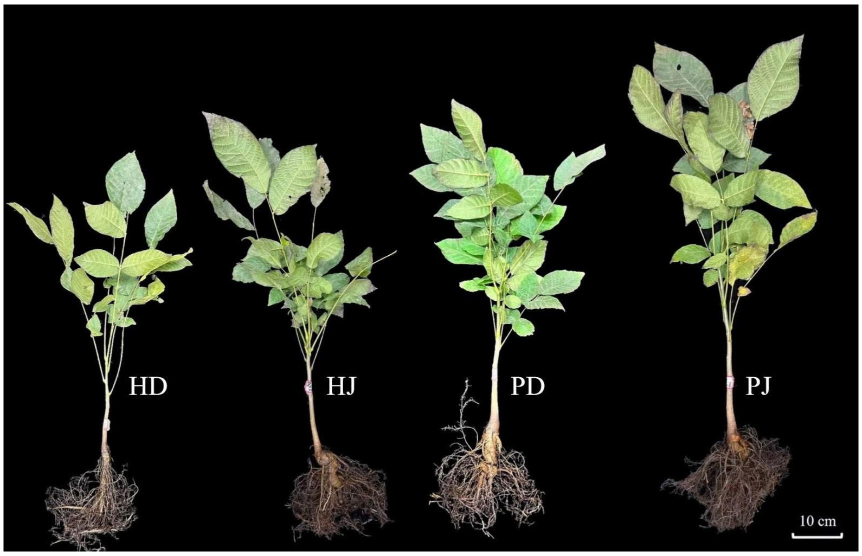


图3　核桃苗在四种处理下栽植4个月后的生长状况

Fig. 3　The growth status of walnut seedlings after 4 months of planting under four treatments

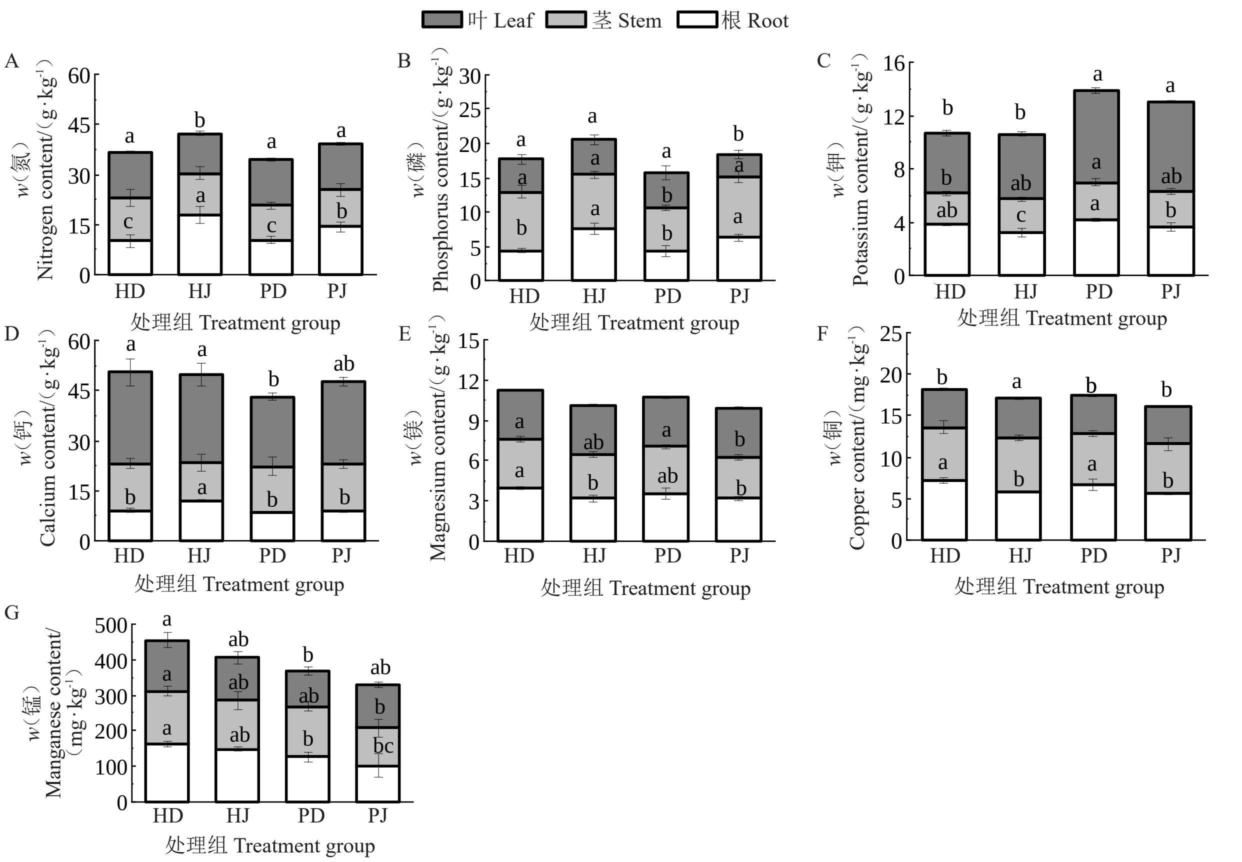


图4　四种处理下核桃苗根、茎、叶矿质元素的含量

Fig. 4　Mineral element content in the roots, stems, and leaves of walnut seedlings under the four treatments

的锰含量分别高于HJ、PJ处理9.06%、6.47%；18.78%、25.10%(图4-G)。

由图5可知，两组普通土处理PD、PJ对氮、磷、钾的富集分别显著高于两组核桃土HD、HJ处理28.24%、31.71%、18.77%；44.70%、78.54%、10.51%。PJ处理对钙的富集显著高于HJ处理12.17%。HJ处理对铜的富集显著高于PJ处理9.37%。HD、HJ对锰的富集显著高于PD、PJ处理25.59%、32.31%。

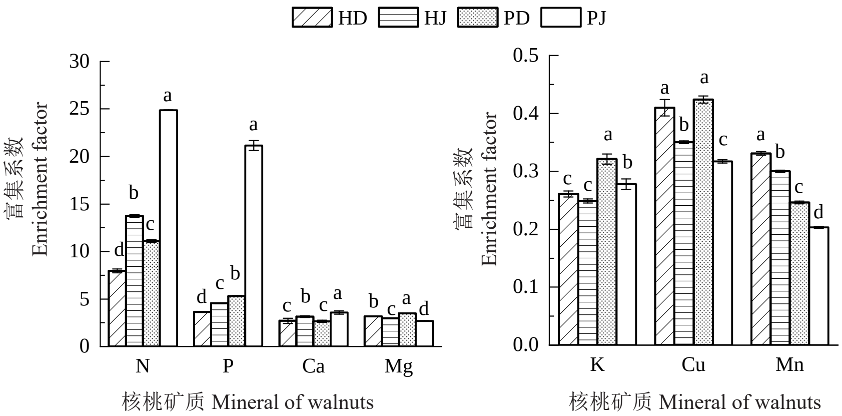


图5　四种处理对核桃矿质元素富集系数的影响

Fig. 5　The effects of four treatments on the enrichment factor of mineral elements in walnuts

氮、磷、钙在间作下富集系数得到显著提升，其中PJ富集系数最高，分别显著高于PD处理55.45%、74.87%、25.91%，HJ显著高于HD处理42.19%、20.04%、13.79%。钾、镁、铜、锰在单作下富集系数更高，表现为PD显著高于PJ处理13.51%（钾），HD、PD显著高于HJ、PJ处理6.09%、23.23%（镁），14.59%、25.15%（铜）；9.31%、17.50%（锰）。

2.4　土壤类型和栽植方式对土壤养分和酶活性的影响

2.4.1　*土壤类型和栽植方式对土壤养分的影响*　种植4个月后PD、PJ土壤全氮、全磷、钙、有机质含量较HD、HJ分别降低29.17%、33.75%、15.55%、20.03%；49.16%、81.28%、33.93%、11.78%（图6-A、B）。PD、PJ土壤锰含量较HD、HJ提高了3.88%、14.11%，有效磷和速效钾分别显著高出HD、HJ的47.45%、60.07%和44.95%、33.47%，铵态氮在各处理间无显著差异（图6-C）。间作处理HJ、PJ全氮含量较单作HD、PD分别降低23.96%、45.42%。HJ、PJ有机质和有效磷含量较单作处理HD、PD提升了8.98%、17.49%和28.78%、45.89%，pH值较HD、PD提高了1.26%、1.07%，电导率在各处理间无显著差异（图6-D）。

总体来说，种植后的普通土壤全氮、全磷、钙和有机质含量较核桃土壤低，锰含量提升。间作处理增加了土壤中有效磷和有机质含量，提升了pH值。

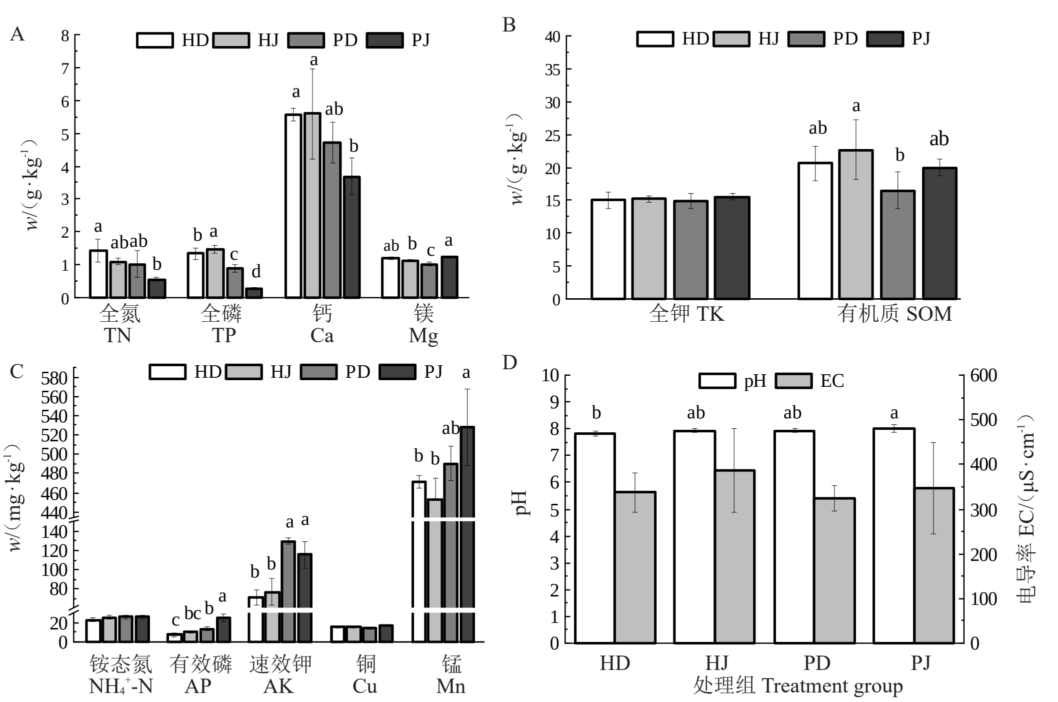


图6　四种处理对土壤化学性质的影响

Fig. 6　Effects of the four treatments on soil chemical properties

2.4.2　土壤类型和栽植方式对土壤酶活性的影响　如图7所示，PJ土壤脱氢酶活性较PD显著提高了35.85%；HJ土壤脲酶活性最高，较HD、PD和PJ分别显著高出31.40%、7.56%和38.52%，同时PD较PJ高出33.49%。HJ的土壤蔗糖酶活性亦为最高，较HD、PD和PJ处理分别显著提高31.66%、39.78%和41.32%。HJ、PJ表现出较高的土壤碱性磷酸酶活性，较HD、PD显著高出41.10%、31.92%。

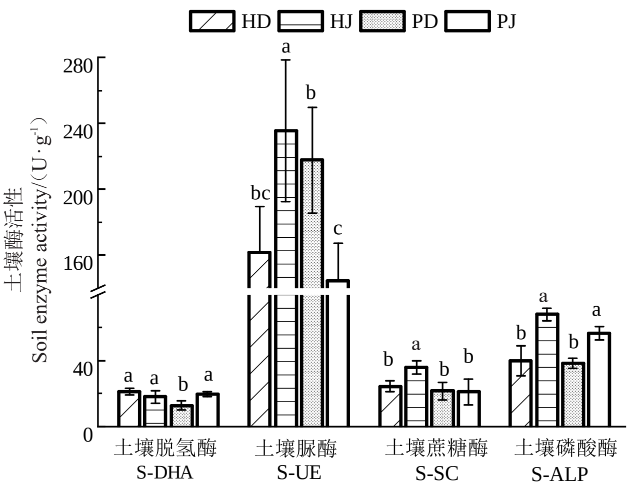


图7　四种处理对土壤脱氢酶、脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性的影响

Fig. 7　Effects of the four treatments on soil dehydrogenase, urease, sucrase and alkaline phosphatase

2.5　核桃苗形态、生理指标与土壤因子的相关性分析

图8-A显示，土壤有效磷与叶绿素相对含量呈显著正相关，与根中锰含量呈显著负相关。土壤速效钾与分枝数呈显著正相关，与叶面积呈极显著正相关，r为0.997 4。根部的锰含量与株高、地径呈显著负相关，与叶绿素相对含量存在极显著负相关关系。土壤碱性磷酸酶活性与根中的氮、磷含量呈极显著正相关，r分别为0.995 7、0.999 9。土壤蔗糖酶活性与根的钙含量呈显著正相关。图8-B显示，速效钾与茎的锰含量呈显著负相关，土壤脱氢酶活性与茎的磷含量呈显著正相关。图8-C显示，核桃叶

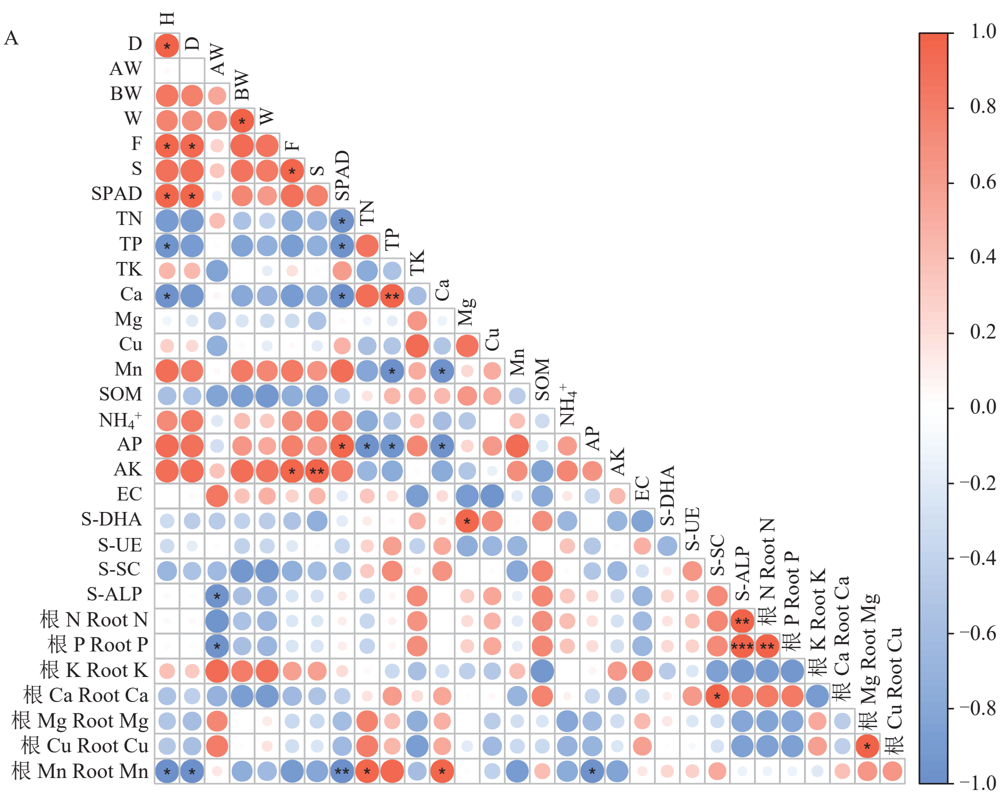
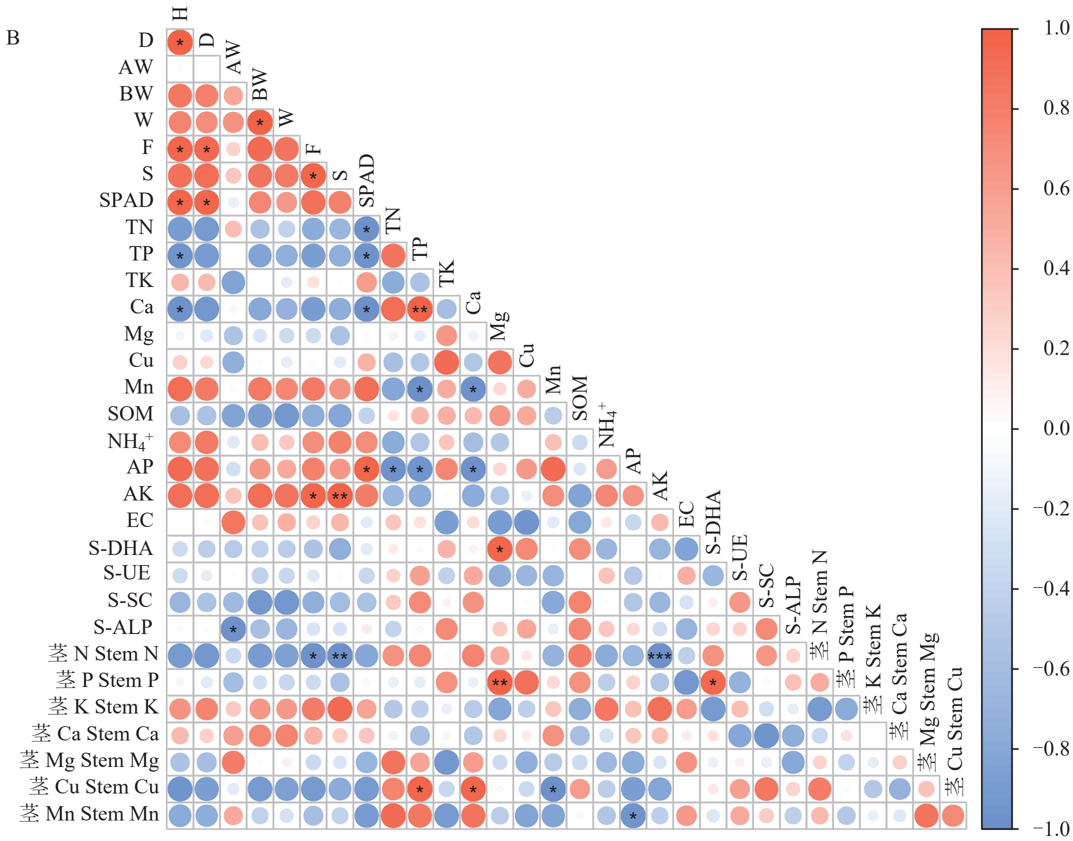


图8分别为核桃生长指标、土壤性质与根（A）、茎（B）、叶（C）矿质元素含量的相关性分析。H. 株高；D. 地径；W. 生物量；AW. 地上生物量；BW. 地下生物量；F. 分枝数；S. 叶面积；SPAD. 叶绿素相对含量；根N. 根的氮含量；茎N. 茎的氮含量；叶N. 核叶中氮含量；以此类推。*、**、***分别代表不同指标在 $P<0.05$、$P<0.01$、$P<0.001$ 水平显著相关。

Figure 8 shows the correlation between walnut growth indicators, soil properties, and mineral element content in roots (A), stems (B), and leaves (C). H. Height; D. Diameter; W. Biomass; AW. Aboveground biomass; BW. Belowground biomass; F. Branching number; S. Leaf area; SPAD. Chlorophyll content; Root N. Nitrogen in roots; Stem N. Nitrogen in stems; Leaf N. Nitrogen in leaves; etc. *, **, *** represent different levels of significance in correlation: $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively.

图8　核桃苗形态、生理指标与土壤因子相关性分析

Fig. 8　Correlation analysis between morphological and physiological indicators of walnut seedlings and soil factors



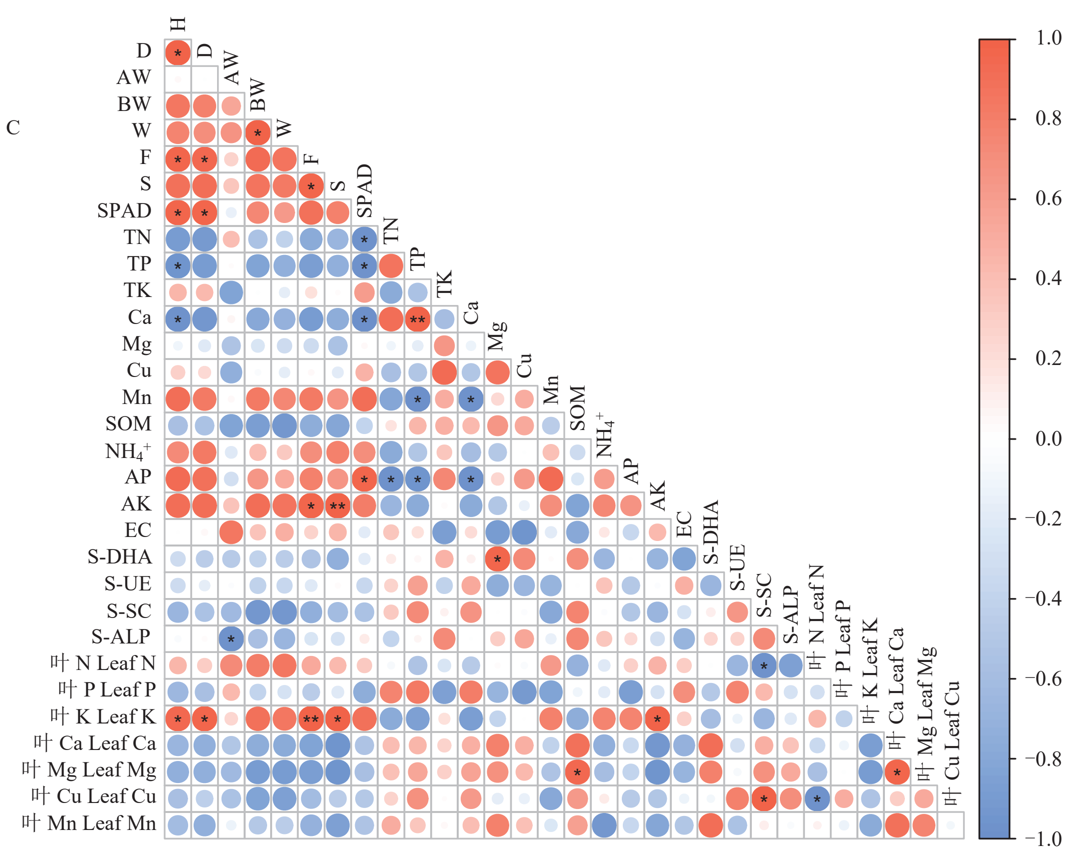


图 8 （续） **Fig. 8 (Continued)**

的钾含量与株高、地径、叶面积、速效钾呈显著正相关，与分枝数呈极显著正相关，r为0.995 6。土壤有机质含量与叶的镁含量呈显著正相关。土壤蔗糖酶活性与叶的铜含量呈显著正相关。

3 讨 论

3.1 连作成因以及对核桃苗的影响

在种植17 a的连作核桃土壤中，核桃苗生长受到了抑制，表现为株高、地径、生物量、叶面积、分枝数均低于普通土处理。连作造成了核桃土壤的有效磷、速效钾含量降低。相关性分析显示，土壤有效磷含量与叶绿素相对含量呈显著正相关，速效钾含量与分枝数、叶面积及叶的钾含量呈显著正相关，可见连作导致有效养分减少是核桃生长缓慢的原因之一。灵芝连作导致土壤速效磷和速效钾含量显著降低，引起连作障碍，与本研究结果一致[28]。另外，未种植前核桃土壤中锰含量显著高于普通土，可能是由于核桃根系长期分泌有机酸，提高了锰的移动性和有效性[29-30]，造成核桃土处理下植株体内锰含量的增加，而根部的锰含量与株高、地径、叶绿素相对含量存在显著负相关关系。幼苗阶段对锰的敏感性较高，过量的锰直接对核桃造成伤害[31]。以上土壤有效态的失衡以及锰的毒害可能是造成核桃连作生长受限的关键因素。

核桃叶片钾含量与株高、地径、叶面积及分枝数均呈显著正相关，连作导致核桃土壤有效钾的失衡，抑制了叶片对钾的吸收，从而限制了核桃发育。有研究表明，缺钾会导致核桃树的根系和地上部分生长以及光合色素的合成受到明显影响[32]。本试验核桃连作对钾元素影响最大，是导致生长发育受限的关键矿质元素。另外，核桃土叶片的钙含量呈现显著高于普通土的现象，可能与钙的运输机制相关。推测普通土中的核桃苗生长较快，耗水多，导致叶片水势差增大，增加了水分传输阻力，抑制了钙向叶片的运输[33-34]。

种植4个月后普通土壤的全氮、全磷、钙、有机质含量低于核桃土壤，而有效磷和速效钾含量显著提升。在普通土壤中，植株的生长条件更为优越，核桃生长速度更快，提高了对氮、磷、钾、钙的富集量，在有限的土壤环境下，加快了养分的补充，从而释放出磷、钾有效态元素[35-36]。

3.2 间作对土壤及核桃苗的改良

间作显著提高了核桃根部的氮、磷、钙富集量和氮、磷的含量，降低了核桃对镁、铜、锰的富集量。镁作为叶绿素的中心原子，为光合作用提供动力，促进生长[37]。相关性分析显示，土壤蔗糖酶活性与叶片铜含量、根部钙含量均呈显著正相关。HJ土壤蔗糖酶活性显著高于HD，表明间作处理可能通过提高蔗糖酶活性，进而提升植物叶片铜含量。大多数农作物叶片中铜的含量在20~30 mg·kg^{-1} [38]。在适宜范围内提高铜含量有助于提升叶绿素含量、光合速率及作物的产量[39]。此外，蔗糖酶在有机物分解过程中发挥重要作用[40]，释放出更多的可用养分，进而间接影响根系对钙的吸收。间作还显著提升了土壤碱性磷酸酶活性，其与核桃根部的氮、磷含量呈极显著正相关，说明间作下土壤碱性磷酸酶活性增强，核桃根系对氮、磷的吸收能力也随之提高。磷酸酶水解有机磷化合物，释放植物可吸收的无机磷[41]，这有助于提高根系的磷含量，进而促进其他营养元素的吸收和代谢。土壤蔗糖酶、磷酸酶活性的提升可能是间作处理下核桃根部氮、磷、钙含量提高的重要原因。土壤脱氢酶反映了土壤中微生物的代谢活性[42]，且土壤脱氢酶与茎中磷含量呈显著正相关。PJ较PD脱氢酶活性显著升高意味着该处理下的微生物活动更活跃，促进了土壤中磷的转化和释放进而提高了植物对磷的吸收能力。但PJ脲酶、蔗糖酶活性均低于PD，可能与PJ核桃苗较快成熟引起氮素需求降低有关。土壤蔗糖酶活性与脲酶活性变化相似，反映了微生物对氮素和纤维素分解的需求减少以维持土壤系统中C/N平衡[43]。间作下碱性磷酸酶活性得到了提高，可能是仍需满足植物和微生物的正常需求，激发微生物的响应来提高土壤磷酸酶活性。

间作还增加了土壤有效磷含量。间作下不同植物根系分泌物相互作用影响了根际微生物，活化了难溶性养分，改善磷释放的条件[44]。如蚕豆根系分泌物引起根际酸化有助于活化土壤难溶性磷，从而促进玉米对磷的吸收[45]。间作下核桃根、茎的锰含量以及根部的铜含量均低于单作模式，这与玉米与豌豆间作[46]、玉米与景天属植物间作的研究结果相似[47]。土壤中部分微量元素可能被间作作物黄芩吸收，或间作中土壤微生物群落，尤其是细菌和真菌的种群结构及数量发生变化，通过微生物吸附、沉淀或分解等代谢过程，降低土壤中的铜、锰元素含量[48]，从而缓解重金属可能带来的毒害。

大量实例表明间作对土壤改良、作物生长有显著的积极效应。核桃与大豆、玉米间作增强了脲酶、

蔗糖酶、碱性磷酸酶的活性[49]。薄壳山核桃与油茶间作提高了土壤pH以及水解性氮、有效磷和有机质含量[50]。间作可促进促生菌、绿肥作物残体的分解[51]，增强玉米对钙和磷的吸收能力[52]。核桃与大豆间作提升了对氮的吸收和转移能力[53]。通过合理设计间作系统来改善土壤环境和影响矿质吸收，减少土壤中有害元素的积累，是缓解连作障碍的有效方式。

4 结 论

核桃苗在核桃土连作下其株高、地径、生物量、叶面积、分枝数受到了抑制。连作导致土壤有效磷、速效钾含量降低，锰含量升高，抑制了核桃叶片对钾的吸收，提高了锰含量，钾是导致生长受限的关键矿质元素。间作能提升土壤有效磷、有机质含量及碱性磷酸酶活性，提高核桃根部的氮、磷含量和对氮、磷、钙的富集量，降低核桃根、茎的锰及根部的铜含量。

参考文献 References:

[1] 王磊，曹亚龙，孟海军，赵伟，张港港，韩轩轩，樊璐，卢战平，董兆斌，王根宪，吴国良．国内外核桃品种选育研究进展[J]. 果树学报，2022，39(12)：2406-2417.
WANG Lei，CAO Yalong，MENG Haijun，ZHAO Wei，ZHANG Ganggang，HAN Xuanxuan，FAN Lu，LU Zhanping，DONG Zhaobin，WANG Genxian，WU Guoliang. Research progress in walnut variety breeding at home and abroad[J]. Journal of Fruit Science，2022，39(12)：2406-2417.

[2] 李洋，张赟齐，温玥，张绥林，陈永浩，齐建勋，张俊佩，侯智霞．早实核桃坚果表型和内在品质的关联分析及模型构建[J]. 南京林业大学学报（自然科学版），2025，49(1)：119-127.
LI Yang，ZHANG Yunqi，WEN Yue，ZHANG Suilin，CHEN Yonghao，QI Jianxun，ZHANG Junpei，HOU Zhixia. Correlation analysis and model construction of nut phenotype and kernel quality of early-fruiting walnuts (*Juglans regia*)[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)，2025，49(1)：119-127.

[3] 赵登超，刘方春，曾宪泉，刘丙花，马海林，辛兆年，侯立群．早实核桃'香玲'低产园更新改造技术[J]. 生物灾害科学，2020，43(4)：392-396.
ZHAO Dengchao，LIU Fangchun，ZENG Xianquan，LIU Binghua，MA Hailin，XIN Zhaonian，HOU Liqun. Reconstruction technical regulations for low-yield orchards of early fruiting walnut 'Xiangling'[J]. Biological Disaster Science，2020，43(4)：392-396.

[4] 李胜繁．核桃化感作用研究及应用进展[J]. 现代农业科技，2022(16)：106-108.
LI Shengfan. Progress on study and application of walnut allelopathy[J]. Modern Agricultural Science and Technology，2022(16)：106-108.

[5] 何邦印，胡佳佳，裴婧宏，房美艳，李江文．果树凋落叶浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿的化感效应[J]. 西北植物学报，2024，44(8)：1295-1304.
HE Bangyin，HU Jiajia，PEI Jinghong，FANG Meiyan，LI Jiangwen. Allelopathic effects of litter extracts from fruit trees on *Lolium perenne* and *Medicago sativa*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2024，44(8)：1295-1304.

[6] 赵玉雪，孙建昌，杨霞，朱佳敏，刘亚娜．核桃青皮不同浸提方式对辣椒和番茄的化感作用研究[J]. 贵州林业科技，2018，46(4)：44-47.
ZHAO Yuxue，SUN Jianchang，YANG Xia，ZHU Jiamin，LIU Yana. Study on allelopathy of different extraction methods of walnut green husk on chili and tomato[J]. Guizhou Forestry Science and Technology，2018，46(4)：44-47.

[7] 陈志怡，杨森，李敏．核桃根水浸提液对魔芋生长及抗性生理指标的化感效应研究[J]. 安徽农业科学，2023，51(14)：7-10.
CHEN Zhiyi，YANG Sen，LI Min. Study on allelopathic effect of walnut root water extract on the growth and resistance physiological indicators of konjac[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2023，51(14)：7-10.

[8] 耿贵，杨瑞瑞，於丽华，吕春华，李任任，王宇光．作物连作障碍研究进展[J]. 中国农学通报，2019，35(10)：36-42.
GENG Gui，YANG Ruirui，YU Lihua，LÜ Chunhua，LI Renren，WANG Yuguang. Crop continuous cropping obstacles：Research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2019，35(10)：36-42.

[9] LIU H，PAN F J，HAN X Z，SONG F B，ZHANG Z M，YAN J，XU Y L. A comprehensive analysis of the response of the fungal community structure to long-term continuous cropping in three typical upland crops[J]. Journal of Integrative Agriculture，2020，19(3)：866-880.

[10] 尹承苗，王玫，王嘉艳，陈学森，沈向，张民，毛志泉．苹果连作障碍研究进展[J]. 园艺学报，2017，44(11)：2215-2230.
YIN Chengmiao，WANG Mei，WANG Jiayan，CHEN Xuesen，SHEN Xiang，ZHANG Min，MAO Zhiquan. The research advance on apple replant disease[J]. Acta Horticulturae Sinica，2017，44(11)：2215-2230.

[11] 余高，赵仕龙，冯顺梅，陈芬．连作年限对喀斯特山地设施辣椒根际土壤养分、酶活性及真菌群落结构的影响[J]. 江苏农业科学，2024，52(18)：270-277.
YU Gao，ZHAO Shilong，FENG Shunmei，CHEN Fen. Influences of continuous cropping years on soil nutrient，enzyme activities，and fungal community characteristics of facility pepper rhizosphere in Karst mountains[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2024，52(18)：270-277.

[12] 郑梅迎，刘福童，郑邦玺，黄治宏，徐画晴，张雅楠，何文勤，姚峰，任天宝．不同年限烤烟连作对土壤养分和微生物变化的影响[J]. 华中农业大学学报，2024，43(4)：182-191.
ZHENG Meiying，LIU Futong，ZHENG Bangxi，HUANG Zhihong，XU Huaqing，ZHANG Yanan，HE Wenqin，YAO Feng，REN Tianbao. Effects of different years of continuously cropping flue-cured tobacco on changes of nutrients and microbial community in soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2024，43(4)：182-191.

[13] 古军霞，李阳，孙会改，郑倩，严玉平，韩晓伟．连作对北沙参土壤养分、酶活性及微生物群落多样性的影响[J]. 中药材，2021，44(10)：2262-2267.
GU Junxia，LI Yang，SUN Huigai，ZHENG Qian，YAN Yuping，

HAN Xiaowei. Effects of continuous cropping on soil nutrients，enzyme activities and microbial community diversity of *Glehnia littoralis*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials，2021，44(10)：2262-2267.

[14] 于雅静. 老龄核桃园、葡萄园土壤对新栽平邑甜茶幼苗的影响[D]. 泰安：山东农业大学，2024.
YU Yajing. The effect of aged walnut orchard and vineyard soil on newly planted *Malus hupehensis* Rehd. seedlings[D]. Tai'an：Shandong Agricultural University，2024.

[15] 李远想，王尚堃. 果树再植病研究进展[J]. 北方园艺，2019(4)：149-154.
LI Yuanxiang，WANG Shangkun. Research progress on fruit replant disease[J]. Northern Horticulture，2019(4)：149-154.

[16] 李贺勤，李星月，刘奇志，张林林，白鹏华，白春启，王玉玲. 连作障碍调控技术研究进展[J]. 北方园艺，2013(23)：193-197.
LI Heqin，LI Xingyue，LIU Qizhi，ZHANG Linlin，BAI Penghua，BAI Chunqi，WANG Yuling. Research progress on the regulation technology of continuous cropping obstacle[J]. Northern Horticulture，2013(23)：193-197.

[17] GITARI H I，GACHENE C K K，KARANJA N N，KAMAU S，NYAWADE S，SCHULTE-GELDERMANN E. Potato-legume intercropping on a sloping terrain and its effects on soil physicochemical properties[J]. Plant and Soil，2019，438(1)：447-460.

[18] XIAO J X，ZHU Y G，DONG Y，YIN X H，TANG L，ZHENG Y. Wheat and faba bean intercropping changes phenolic acids from roots to rhizosphere[J]. Acta Ecologica Sinica，2023，43(1)：89-98.

[19] ZHU Q R，YANG Z Y，ZHANG Y P，WANG Y Z，FEI J C，RONG X M，PENG J W，WEI X M，LUO G W. Intercropping regulates plant- and microbe-derived carbon accumulation by influencing soil physicochemical and microbial physiological properties[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2024，364：108880.

[20] 刘凯，李津津，赵星哲，王芳，王红霞，张俊佩，马庆国，张志华. 间作黄豆、花生对核桃幼苗及土壤化学性质的影响[J]. 河北农业大学学报，2021，44(3)：22-28.
LIU Kai，LI Jinjin，ZHAO Xingzhe，WANG Fang，WANG Hongxia，ZHANG Junpei，MA Qingguo，ZHANG Zhihua. Effects of intercropping soybean and peanut on walnut seedlings and soil chemical properties[J]. Journal of Hebei Agricultural University，2021，44(3)：22-28.

[21] WANG C X，LIANG Q，LIU J N，ZHOU R，LANG X Y，XU S Y，LI X C，GONG A D，MU Y T，FANG H C，YANG K Q. Impact of intercropping grass on the soil rhizosphere microbial community and soil ecosystem function in a walnut orchard[J]. Frontiers in Microbiology，2023，14：1137590.

[22] BAI Y C，LI B X，XU C Y，RAZA M，WANG Q，WANG Q Z，FU Y N，HU J Y，IMOULAN A，HUSSAIN M，XU Y J. Intercropping walnut and tea：Effects on soil nutrients，enzyme activity，and microbial communities[J]. Frontiers in Microbiology，2022，13：852342.

[23] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典：一部[M]. 北京：中国医药科技出版社，2020：314.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's republic of China：Volume 1[M]. Beijing：China Medical Science Press，2020：314.

[24] 许小明，彭晓邦，赵培. 秦岭生态环境保护研究进展[J]. 江西农业学报，2023，35(10)：120-127.
XU Xiaoming，PENG Xiaobang，ZHAO Pei. Research progress in ecological environmental protection in Qinling Mountains[J]. Acta Agriculturae Jiangxi，2023，35(10)：120-127.

[25] 武雅娟，高同雨，李晶，苏本营. 生态涵养区林下经济发展特征及对策建议：以北京市门头沟区为例[J]. 农业科技通讯，2022(11)：6-10.
WU Yajuan，GAO Tongyu，LI Jing，SU Benying. Characteristics and policy recommendations for the development of forestry economy in ecological conservation areas：A case study of Mentougou district，Beijing[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology，2022(11)：6-10.

[26] 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.

[27] 魏福晓，颜秋晓，王道平，林绍霞，邓廷飞，杨莹，梁光焰. 辣椒幼苗对镉胁迫的生理生化响应[J]. 云南农业大学学报（自然科学），2024，39(6)：121-132.
WEI Fuxiao，YAN Qiuxiao，WANG Daoping，LIN Shaoxia，DENG Tingfei，YANG Ying，LIANG Guangyan. Physiological and biochemical responses of *Capsicum annuum* L. seedlings to cadmium stress[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)，2024，39(6)：121-132.

[28] 卢孟召，刘梅，陈光，王雪峰. 灵芝连作对土壤理化性质及线虫群落的影响[J]. 吉林农业大学学报，2022，44(5)：586-594.
LU Mengzhao，LIU Mei，CHEN Guang，WANG Xuefeng. Effects of *Ganoderma lingzhi* continuous cropping on soil physicochemical properties and nematode community[J]. Journal of Jilin Agricultural University，2022，44(5)：586-594.

[29] MENCH M，MARTIN E. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L.，*Nicotiana tabacum* L. and *Nicotiana rustica* L.[J]. Plant and Soil，1991，132(2)：187-196.

[30] 崔翠，蔡靖，张硕新. 核桃根系分泌物化感物质的分离与鉴定[J]. 林业科学，2013，49(2)：54-60.
CUI Cui，CAI Jing，ZHANG Shuoxin. Isolation and identification of the allelochemicals in walnut (*Juglans regia*) root exudates[J]. Scientia Silvae Sinicae，2013，49(2)：54-60.

[31] LI J F，JIA Y D，DONG R S，HUANG R，LIU P D，LI X Y，WANG Z Y，LIU G D，CHEN Z J. Advances in the mechanisms of plant tolerance to manganese toxicity[J]. International Journal of Molecular Sciences，2019，20(20)：5096.

[32] 黄小辉，吴焦焦，冯大兰，孙向阳. 缺钾胁迫对核桃幼苗生长及生理特性的影响[J]. 北京林业大学学报，2022，44(8)：23-30.
HUANG Xiaohui，WU Jiaojiao，FENG Dalan，SUN Xiangyang. Effects of potassium deficient stress on growth and physiological characteristics of walnut seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University，2022，44(8)：23-30.

[33] RADIN J W，EIDENBOCK M P. Hydraulic conductance as a factor limiting leaf expansion of phosphorus-deficient cotton plants[J]. Plant Physiology，1984，75(2)：372-377.

[34] MARTRE P，NORTH G B，NOBEL P S. Hydraulic conductance and mercury-sensitive water transport for roots of *Opuntia acan-*

thocarpa in relation to soil drying and rewetting[J]. Plant Physiology，2001，126(1)：352-362.

[35] CHEN Y D，YANG L，ZHANG L M，LI J R，ZHENG Y L，YANG W W，DENG L L，GAO Q，MI Q L，LI X M，ZENG W L，DING X H，XIANG H Y. Autotoxins in continuous tobacco cropping soils and their management[J]. Frontiers in Plant Science，2023，14：1106033.

[36] MA L，MA S Y，CHEN G P，LU X，CHAI Q，LI S. Mechanisms and mitigation strategies for the occurrence of continuous cropping obstacles of legumes in China[J]. Agronomy，2024，14(1)：104.

[37] AHMED N，ZHANG B G，BOZDAR B，CHACHAR S，RAI M，LI J，LI Y Q，HAYAT F，CHACHAR Z，TU P F. The power of magnesium：Unlocking the potential for increased yield，quality，and stress tolerance of horticultural crops[J]. Frontiers in Plant Science，2023，14：1285512.

[38] ANJUM N A，ADAM V，KIZEK R，DUARTE A C，PEREIRA E，IQBAL M，LUKATKIN A S，AHMAD I. Nanoscale copper in the soil-plant system - toxicity and underlying potential mechanisms[J]. Environmental Research，2015，138：306-325.

[39] 马强，张民，李子双，李洪杰，王湘峻，耿计彪，路艳艳．铜基营养叶面肥提高棉花光合特性、产量及其防病效果[J]. 植物营养与肥料学报，2018，24(4)：969-980.
MA Qiang，ZHANG Min，LI Zishuang，LI Hongjie，WANG Xiangjun，GENG Jibiao，LU Yanyan. Effects of copper-based nutritional foliar fertilizers on photosynthetic characteristics，yield and disease control efficiency of cotton[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2018，24(4)：969-980.

[40] 张涵，贡璐，刘旭，邵康，李昕竹，李蕊希．氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性[J]. 环境科学，2021，42(1)：403-410.
ZHANG Han，GONG Lu，LIU Xu，SHAO Kang，LI Xinzhu，LI Ruixi. Soil enzyme activity in *Picea schrenkiana* and its relationship with environmental factors in the Tianshan Mountains，Xinjiang[J]. Environmental Science，2021，42(1)：403-410.

[41] 朱芸芸，李敏，曲博，赵暾，滕泽栋．湿地植物根际土壤磷酸酶活性变化规律研究[J]. 环境科学与技术，2016，39(10)：106-112.
ZHU Yunyun，LI Min，QU Bo，ZHAO Tun，TENG Zedong. Research on the variations of phosphatase activity in rhizosphere soil of wetland plants[J]. Environmental Science & Technology，2016，39(10)：106-112.

[42] CALDWELL B A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity：A review[J]. Pedobiologia，2005，49(6)：637-644.

[43] 盛美君，李胜君，杨昕玥，王蕊，李洁，李刚，修伟明．华北潮土农田土壤酶活性对土地利用强度的响应特征探讨[J]. 生态环境学报，2023，32(2)：299-308.
SHENG Meijun，LI Shengjun，YANG Xinyue，WANG Rui，LI Jie，LI Gang，XIU Weiming. Changes of soil enzyme activities in cropland with different land use intensities in fluvo-aquic soil area，North China[J]. Ecology and Environmental Sciences，2023，32(2)：299-308.

[44] 尹晓童，杨浩，于瑞鹏，李隆．根系分泌物在作物多样性体系中对种间地下部互作的介导作用[J]. 中国生态农业学报(中英文)，2022，30(8)：1215-1227.
YIN Xiaotong，YANG Hao，YU Ruipeng，LI Long. Interspecific below-ground interactions driven by root exudates in agroecosystems with diverse crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2022，30(8)：1215-1227.

[45] YIN X T，ZHANG F F，YU R P，LIU N，ZHANG W P，FORNARA D，MOMMER L，LI X X，LI L. Root exudates drive root avoidance of maize in response to neighboring wheat[J]. Plant and Soil，2025，510(1)：507-524

[46] 徐健程，王晓维，聂亚平，罗杰，杨潇一，杨文亭．不同铜浓度下玉米间作豌豆对土壤铜的吸收效应研究[J]. 农业环境科学学报，2015，34(8)：1508-1514.
XU Jiancheng，WANG Xiaowei，NIE Yaping，LUO Jie，YANG Xiaoyi，YANG Wenting. Effect of maize-pea intercropping on crop copper accumulation under different copper concentrations[J]. Journal of Agro-Environment Science，2015，34(8)：1508-1514.

[47] LI Z X，SHANG Q Y，ZOU L，XING Z N，CHEN G L，CHEN Z，ZHOU J L，LIU X L. The dynamic response mechanism of crops to manganese uptake and transfer mediated by different intercropping crop attributes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2024，104(15)：9706-9718.

[48] 徐金玉，王伟伟，王惠，张海燕．铜污染土壤的生物修复研究进展[J]. 生物工程学报，2020，36(3)：471-480.
XU Jinyu，WANG Weiwei，WANG Hui，ZHANG Haiyan. Progress in bioremediation of copper-contaminated soils[J]. Chinese Journal of Biotechnology，2020，36(3)：471-480.

[49] 邱梅．黄土坡地核桃林不同间作模式土壤养分及酶活性研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2014.
QIU Mei. Study on soil nutrient & enzyme activity under different intercropping mode of walnut forest on loess plateau[D]. Yangling：Northwest A & F University，2014.

[50] 徐永杰，吴强盛，汪芳玲，徐雅雯，韩梦壮，肖之炎．油茶和薄壳山核桃间作对土壤养分和真菌多样性的影响[J]. 中南林业科技大学学报，2024，44(1)：28-36.
XU Yongjie，WU Qiangsheng，WANG Fangling，XU Yawen，HAN Mengzhuang，XIAO Zhiyan. Effects of intercropping *Camellia oleifera* and *Carya illinoinensis* on soil nutrients and fungal diversity[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2024，44(1)：28-36.

[51] 丁婷婷，段廷玉．果园绿肥对果树-土壤-微生物系统影响研究进展[J]. 果树学报，2021，38(12)：2196-2208.
DING Tingting，DUAN Tingyu. Research progress on the influence of orchard green manure on fruit tree-soil-microbe system[J]. Journal of Fruit Science，2021，38(12)：2196-2208.

[52] 夏海勇，孔玮琳，薛燕慧，汤艳艳，汪宝卿，刘开昌，万书波．间作对玉米磷、铁、锌和钙素吸收及其在植株体内转移分配的影响[J]. 山东农业科学，2017，49(7)：86-90.
XIA Haiyong，KONG Weilin，XUE Yanhui，TANG Yanyan，WANG Baoqing，LIU Kaichang，WAN Shubo. Effects of intercropping on absorption of phosphorus，iron，zinc and calcium from soil and translocation and allocation in maize plants[J]. Shandong Agricultural Sciences，2017，49(7)：86-90.

[53] 任静，刘小勇，刘芬，彭海，韩富军．核桃/大豆间作对氮素吸收利用及转移的影响[J]. 经济林研究，2022，40(1)：1-10.
REN Jing，LIU Xiaoyong，LIU Fen，PENG Hai，HAN Fujun. Absorption，utilization and transfer efficiency of nitrogen in walnut-soybean intercropping pattern[J]. Non-wood Forest Research，2022，40(1)：1-10.