黄土高原间作大豆对幼龄果园土壤水分及氮素累积的影响

安庆蓉[1,2]，赵西宁[1,3]，赵连豪[3,4]，罗立娇[3,4]，马南方[3,4]，高晓东[1,3]

（1.西北农林科技大学水土保持研究所，陕西 杨凌 71200；2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 71200；3.中国科学院水利部水土保持研究所，陕西 杨凌 71200；4.中国科学院大学，北京 100049）

摘要：为探明间作豆科作物对幼龄果园土壤水分、硝态氮含量以及树木生长的影响，并对黄土高原旱作果园土壤肥力提升与可持续发展提供指导，以黄土丘陵区苹果/黄豆复合系统为研究对象，通过测定种植黄豆整个生育期内试验小区水分、硝态氮含量以及果树叶片含氮量和生理指标的变化来评价不同间作密度黄豆对果树生长的影响。结果表明：(1)相较于清耕果园，中密度间作在黄豆花期前对果园土壤水分含量有一定的提升作用，而高密度间作加剧行间水分的消耗，显著降低土壤含水量。(2)不同土层硝态氮相对累积量随黄豆生育期后移呈现逐渐下移且分布逐渐均衡的趋势，土壤总硝态氮累积量处理间未表现出显著差异。(3)中、高密度间作均可有效提升果树叶片氮含量，促进果树生长，而中密度间作黄豆使土壤含水量最高提升 17.6%，叶片氮含量最高增加 8.04%。因此，中密度间作黄豆在黄土高原旱作苹果园更具有间作优势。

关键词：黄土高原；农林复合系统；土壤水分养分；叶片含氮量

中图分类号：S753.53^{+}6；S152.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2023)05-0152-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.019

Effects of Intercropping Soybean on Soil Water and Nitrogen Accumulation in Young Orchards on the Loess Plateau

AN Qingrong[1,2], ZHAO Xinning[1,3], ZHAO Lianhao[3,4],

LUO Lijiao[3,4], MA Nanfang[3,4], GAO Xiaodong[1,3]

(1.*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100; 2.*College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100; 3.*Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi* 712100; 4.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract: It is of great significance to investigate the effects of intercropping leguminous crops on soil moisture, nitrate nitrogen content and tree growth in young orchards for the improvement of soil fertility and sustainable development of dryland orchards on the Loess Plateau. Taking apple-soybean compound system in the loess hilly-gully region as the research object, the influence of different density of intercropping soybean on fruit tree growth were evaluated by measuring the changes in water and nitrate nitrogen content, as well as the nitrogen content and physiological indicators of fruit tree leaves in the experimental plot during the entire reproductive period of soybean planting. The results showed as follows: (1) Compared with clear tillage orchard, medium density intercropping had a certain effect on the soil moisture content of orchard before soybean flowering, while high density intercropping increased the water consumption between rows and significantly reduced the soil moisture content. (2) The relative accumulation of nitrate nitrogen in different soil layers gradually decreased and the distribution gradually balanced with the reproductive period of soybean, and there was no significant difference in the total nitrate nitrogen accumulation of soil between treatments. (3) Both medium and high density intercropping could effectively increase the leaf nitrogen content of fruit trees and promote fruit trees growth. Soil water content and leaf nitrogen content of medium density soybean intercropping increased by a maximum of 17.6% and 8.04% respectively. Therefore, medium density soybean intercropping had more advantages in dryland apple orchards on the Loess Plateau.

收稿日期：2023-01-13

资助项目：国家自然科学基金项目(42125705)；陕西省青年科技新星项目(2019KJXX-069)

第一作者：安庆蓉(1998—)，女，硕士研究生，主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail：578296376@qq.com

通信作者：赵西宁(1976—)，男，研究员，主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail：zxn@nwsuaf.edu.cn

Keywords: the Loess Plateau; agroforestry system; soil moisture and nutrients; leaf nitrogen content

陕北黄土高原属于典型的温带半干旱地区,年降水量较少,黄土养分含量低,水分和养分的亏缺成为制约当地农业发展的主要限制因子[1-2]。黄土高原实施退耕还林(草)工程后,旱作果园经济特色林发展迅速,成为当地致富的主导产业之一[1,3]。由于传统果园常采用清耕制,易引起水土流失以及养分淋溶等问题[4-6],从而导致果园土壤肥力退化,果树生长受限,产量减少,品质恶化[7]。近年来,国家尤为关注农业发展,农林复合经营模式越来越受到国内外重视[1-3,8-9]。有研究[10-11]表明,与单作相比,农林复合经营可使土壤保持更多的有机碳和全氮储量,间作可以增加土壤孔隙度以及团聚体含量,从而增加土壤肥力,改善果园土壤物理性质以及水分状况[11-12]。因此,构建农林复合系统是提高土地资源利用效率、解决水土流失问题、促进土地可持续高效发展的现代农业发展新趋势[2-3,7]。

豆科植物—根瘤菌的共生生物固氮是目前最高效的生物固氮方式[13],每年固氮量可达 75～150 kg/hm^2,温湿度适宜时甚至达到 300 kg/hm^2,固氮供给量受到土壤本身养分条件的限制[8-9]。一般来说,豆科作物根瘤固氮对氮素积累的贡献率仅占 40%～60%,外源氮的供应对根瘤数量、形态以及固氮能力也有较大的影响[14],在氮含量较低、土壤相对贫瘠的黄土高原,豆科作物的生物固氮潜力有可能被激发[8,10]。然而在黄土高原水资源短缺、土壤瘠薄的苹果园中间作黄豆对果园土壤水分及固氮作物黄豆对氮素累积的影响尚不明晰。因此,揭示黄土高原果园间作对土壤水分及氮素累积的影响,对于促进现代果园发展可持续的绿色复合农业具有深远的意义。

基于在黄土高原间作固氮绿肥对幼龄果园生长以及果园土壤水分和氮素累积情况的研究不足,本文采取野外原位试验的方法,分析种植不同密度黄豆后 4 个关键生育期的水分、硝态氮和果树叶片氮含量及生长状况,探明间作固氮作物对幼龄旱作果园生长的影响,在黄豆不同生育期对土壤储水量以及硝态氮含量和分布的影响,以期为黄土高原构建新型绿色农林复合发展模式提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于陕西省榆林市米脂县远志山旱作幼林果园内(110°22′50″E,37°39′42″N)。该地区属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,海拔 847～1 255 m,多年平均降水量 450 mm,年平均气温 8.4 ℃,属于典型的干旱半干旱地区。降雨主要集中在 7—9 月,土壤以黄绵土为主,属于粉质土,土壤容重 1.29 g/cm^3,田间持水量为 22%,土质均一,有机质含量低,土壤贫瘠。地区植被主要以苹果树和灌草为主,无灌溉条件。气象数据由当地气象局提供(图 1)。

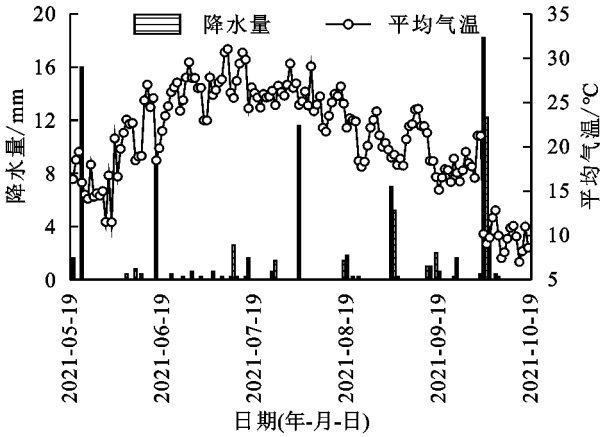

图 1　2021 年生育期降水量及日平均气温

1.2　供试材料

苹果树为 5 年生红富士(*Malus pumila* Mill.),株行距为 3 m×4 m。黄豆(*Glycine max*)具有抗病性好、稳产、耐旱的优点,能较好适应黄土高原的气候条件,试验选用品种为高凌“金豆 228”,5 月中旬穴播于苹果树行间,同年 10 月中旬收获,秸秆还田。

1.3　试验设计

试验设置行间清耕(对照 CK)、以行距为 40 cm(中密度间作 N,45 kg/hm^2)、20 cm(高密度间作 M,90 kg/hm^2)在苹果树行间播种黄豆,共 3 个处理,每个处理设计为占地 32 m^{2}的试验小区,试验小区用铁皮隔离以防止水分和养分侧向运移。每个处理 4 个重复,试验果树主干粗度、枝条数、枝条粗度相对一致,无病虫害。

黄豆播种日期为 2021 年 5 月 19 日,播种前人工翻地,深度为 20 cm。然后划分小区,小区设计为 4 m×8 m,每个小区 2 棵果树,3 个间作带,间作带宽 1.6 m。黄豆种植边缘距苹果树 80 cm。各处理种植方式一致,均为点穴种植,出苗后每穴定苗至 1 株,根据黄豆生育期将整个研究阶段划分为苗期(5 月 19 日至 6 月 28 日)、花期(6 月 28 日至 7 月 24 日)、结荚期(7 月 24 日至 8 月 26 日)和收获期(8 月 26 日至 10 月 18 日),黄豆播种前撒施二胺(100 kg/hm^2)作为底肥,6 月 18 日雨后间作带黄豆追肥 312.5 kg/hm^2(复合肥),无灌溉,采用雨养。

对小区内树下以及间作行间均布设土壤水分监测点(图 2),分别在行间方向距树干 30 cm(果树行)和 200 cm(作物行)布设土壤水分监测点,将每个小

区不同水分监测点同层深度水分进行加权来反映整体试验小区剖面水分状况[1,5,14]，试验共设置 30 个土壤水分监测点。

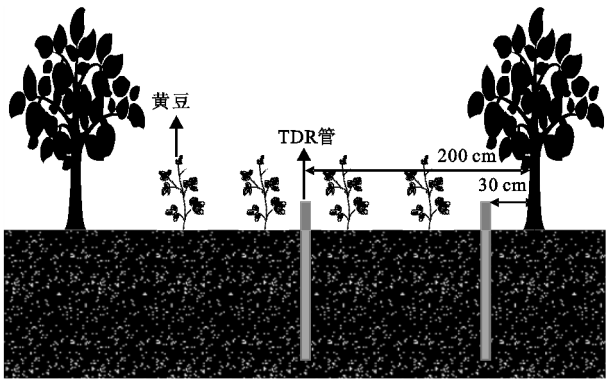

图 2 复合系统水分监测点示意

1.4 测定项目与方法

土壤水分：5—8 月采用传统烘干法测量土壤质量含水量，测量深度为 120 cm，每间隔 20 cm 取样 1 次，8 月布设 Trime-IPH 管式土壤水分测量系统，系统允许测量深度为 200 cm，测量步长为 20 cm 每层，水分监测点布设见图 2。水分测量时段为 2021 年 5—10 月，共计测量 12 次。

在每个地块挖掘 1 m 深的剖面，收集原状土芯，测量干土容重和土壤质量含水量(θ_m，g/g)，然后将其转化为土壤体积含水量(θ_v，cm^3/cm^3)。用烘干法测量现场收集土样的土壤体积含水量(θ_v，cm^3/cm^3)对 TDR 传感器测量的土壤含水量(θ_{TDR}，cm^3/cm^3)进行校准，以提高测量精度。根据实测结果拟合后得出所用校准方程为[15]：

$$\theta_v = 0.89 * \theta_{TDR} + 1.76 \qquad R^2 = 0.89 \tag{1}$$

式中：θ_v为土壤体积含水量(cm^3/cm^3)，由土壤质量含水量乘以干土容重(g/g)再除以纯水密度得到；θ_{TDR}表示由 TDR 传感器获得的土壤体积含水量(cm^3/cm^3)。

土壤硝态氮：在试验小区的间作带和非间作带采用土钻法对 0—120 cm 土壤分层取样，取样步长为 20 cm 每层，采用“S”形取样，将同层土样混合均匀后过 10 目筛，封存带回，自然风干后称取 2.5 g/份，加入 25 mL 的 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提，振荡 30 min 过滤，利用连续流动分析仪(AA30301A)测定硝态氮含量。

果树叶片含氮量和基径：分别在黄豆苗期、花期、结荚期、收获期在果树中上部随机选取成熟叶片 10 片，105 ℃杀青 30 min，75 ℃烘干至恒重后封存带回，凯氏定氮法测植物全氮含量，游标卡尺测量果树基径。

1.4.1 *数据计算* 土壤贮水量(SWS)由每层平均土壤含水量($\theta_{v,i}$)乘以层深(D_i)确定，公式为[11]：

$$SWS_i = \sum^{\theta_{v,i}} * D_i * 10 \tag{2}$$

式中：SWS_i为第 i 层土壤含水量(mm)；$\theta_{v,i}$为第 i 层土壤体积含水量(cm^3/cm^3)；D_i为第 i 层深度(cm)。

储水量亏缺度(SWSD)，计算公式[12]为：

$$SWSD_{j,k} = \frac{(SWS_{j,k} - SWS_{c,k})}{SWS_{c,k}} \tag{3}$$

式中：$SWS_{j,k}$、$SWS_{c,k}$分别为 j 处理第 k 层和对照第 k 层中的土壤储水量。

土壤硝态氮绝对累积量(SNC)由每层土层厚度(H_i)乘以容重(ρ)再乘以土壤硝态氮含量(SNNC)得到，公式[15-16]为：

$$SNC_i = \frac{H_i * \rho * SNNC}{10} \tag{4}$$

式中：SNC_i为第 i 层土壤硝态氮绝对累积量(kg/hm^2)；H_i为第 i 层土层厚度(cm)；ρ 为土壤容重(g/cm^3)；SNNC 为土壤硝态氮含量(mg/kg)。

硝态氮相对累积量(NNRA)由某层硝态氮绝对累积量除以整个剖面硝态氮累积量得出，公式为：

$$NNRA_i = \frac{SNC_i}{\sum SNC_i} * 100\% \tag{5}$$

式中：$NNRA_i$为第 i 层土壤硝态氮相对累积量(%)；SNC_i为第 i 层土壤硝态氮绝对累积量(kg/hm^2)。

1.4.2 *数据处理与统计分析* 运用 Excel 2016 对土壤储水量、土壤硝态氮含量、相对绝对累积量等数据进行统计分析，借助 Origin Pro 2021b SR1 v9.8.5.204 软件绘制柱状图折线图，利用 SPSS 25.0 统计分析软件包中的 One-way ANOVA 方差分析方法对统计结果进行显著性检验，利用最小显著性差异法(LSD)进行因素水平间或处理间多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同间作密度对小区土壤水分的影响

2.1.1 *黄豆不同生育期果园土壤水分垂直变化特征* 由图 3 可知，各处理果园垂直剖面土壤水分存在明显差异。在黄豆苗期，土壤剖面水分整体表现为 N>CK>M，间作土壤水分第 1 个峰值出现在 20—40 cm 土层，CK 处理第 1 个峰值则出现在 40—60 cm 土层，处理间土层土壤含水量差异集中在 0—60 cm 土层。在进入黄豆花期后，处理间各土壤水分状况出现不同分层规律：在 0—20 cm 土层表现为 N>M>CK，在 20—40 cm 土层表现为 N>CK>M，在 40—100 cm 土层表现为 CK>N>M，间作的中层水分相比对照表现为消耗；进入结荚期后，土壤剖面水分整体表现为 CK>N>M，间作对土壤水分消耗变得更为明显，土壤水分含量最低值出现在 40—60 cm 土层；进入收获期后，N、M 处理土壤

水分变化趋于一致,CK 处理土壤含水量明显高于 N、M 处理。N 处理较 CK 土层平均含水量在黄豆苗期、花期分别提升 17.6%,5.4%,M 处理则分别降低 5.9%,2.4%,结荚期后 N、M 处理土壤含水量较 CK 均分别降低 15.9%,20.9%。

对不同处理各土层土壤含水量进行方差分析表明,黄豆苗期各处理苹果树土壤水分 0—40 cm 存在显著性差异($p<0.05$),60—120 cm 则不存在显著差异($p>0.05$);黄豆花期各处理苹果树土壤水分各土层均不存在显著差异($p>0.05$);黄豆结荚期苹果树土壤水分在土层 0—40,60—100 cm 存在显著差异($p<0.05$),而 40—60,100—120 cm 不存在显著差异($p>0.05$);黄豆成熟期苹果树土壤水分在各个土层均表现出显著差异($p<0.05$)。

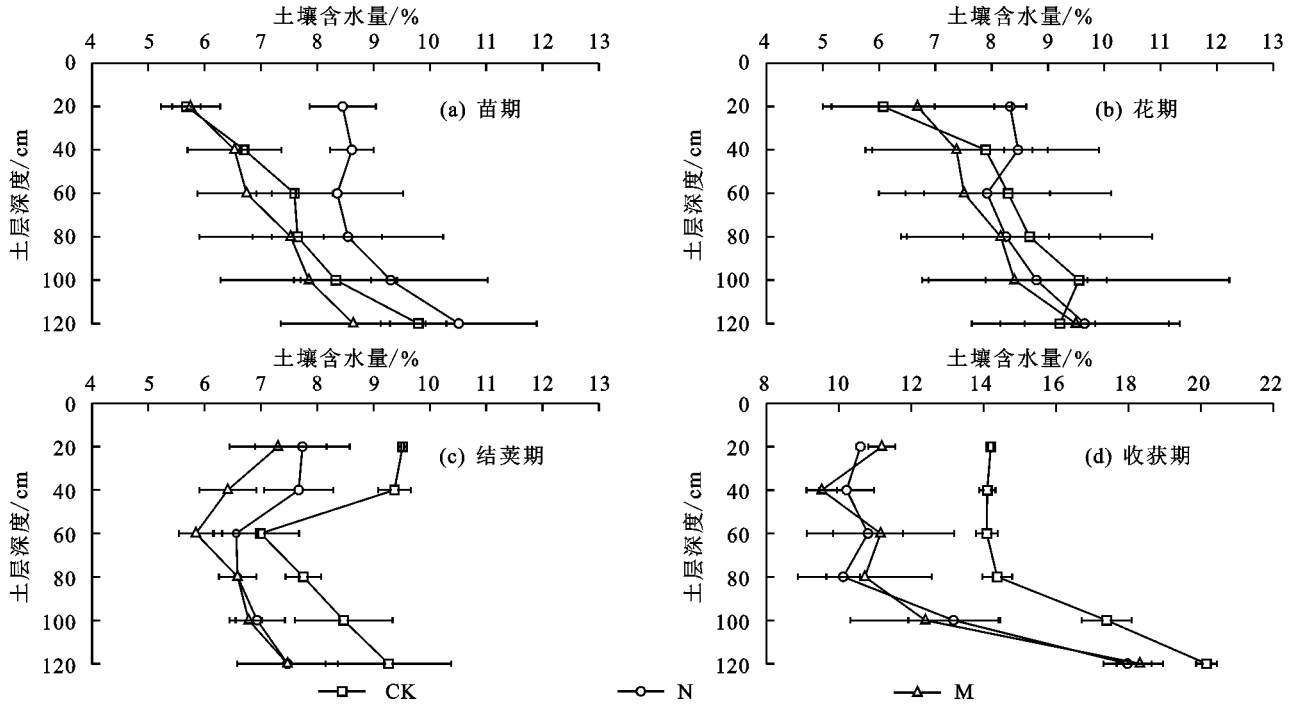

图 3　黄豆不同生育期苹果树土壤水分垂直变化

2.1.2　不同处理间土壤储水量变化　分别计算果树与行间 5 个位置各土层土壤储水量,然后将各位置土层土壤储水量平均后作为该模式下果园各土层土壤储水量。由图 4 可以看出,苗期 N 处理比 CK 储水量明显增加,在 0—40 cm 土层分别提高 26.20%,12.19%,而 M 处理则表现为 0—60 cm 储水量减少,分别减少 32.02%,15.30%,11.99%。花期 N 处理只有在 0—20 cm 土层储水量增加 11.00%,20—120 cm 土层储水量均匀小幅度减少,M 处理在 0—20 cm 土层储水量减少 16.96%,40—80 cm 土层储水量分别小幅增加 1.43%,4.15%。结荚期 N 处理储水量较 CK 开始大幅度减少,而 M 在 0—20 cm 土层储水量提升 6.10%,20—40 cm 土层减少 16.96%,40—120 cm 土层储水量开始均匀小幅度减少。成熟期 N 处理储水量依旧表现为大幅度减少,而 M 处理 20—40 cm 土层储水量减少 9.00%,其余土层均表现为储水量小幅度减少,与 CK 相近。

计算各处理 0—120 cm 土层整体平均储水量(表 1)表明,在 CK、N、M 处理的苗期和花期,平均土层储水量未表现出显著差异,M 处理储水量在苗期和花期低于 CK、N 处理;在结荚期和收获期,CK 与 N、M 土壤储水量差异显著,N、M 土壤储水量显著低于 CK。在苗期和花期,N、M 处理与 CK 相比整体水分亏缺度较低,基本可以忽略(表 2)。黄豆结荚以后 N、M 处理开始出现储水量亏缺加剧的现象,但 2 种间作密度处理的亏缺程度相近,均为 0.20。

2.2　不同处理小区土壤硝态氮累积量变化

分别计算果树树下与行间的土层硝态氮含量,将各土层土壤硝态氮含量平均后作为该模式下果园各土层土壤硝态氮绝对累积量,再由绝对累积量计算得出果园 120 cm 内土壤硝态氮相对累积量。由图 5 可以看出,土壤硝态氮含量在 4 个时期存在明显差异。在苗期,CK、N、M 处理 0—40 cm 土壤硝态氮相对累积量占比最大,0—20 cm 土壤硝态氮相对累积量占比超过 1/2 以上,其中,M 处理 0—20 cm 土壤硝态氮相对累积量最高,占比为 63%,而 N 处理则最低,CK 比 N 处理土壤硝态氮相对累积量提高 2%,20—40 cm 则表现为 N 处理占比最高,而 CK 和 M 处理占比相同,略低于 N 处理;在花期以及结荚期,土壤硝态氮相对累积量整体较为相近,花期土层 0—20 cm 土壤硝态氮 M 处理含量最低,N

处理比 M 处理略高，CK 最高，20—40 cm 土壤中，N、M 处理硝态氮相对累积量相近，均低于 CK；结荚期后，在 0—20 cm 土层中 M 处理比 N 处理提高 6%，但均低于 CK 处理，20—40 cm 土层 N、M 处理相近，也均低于 CK 处理；成熟期后，整体土层硝态氮相对累积量分布发生比较明显的变化，整体变化加深到 80 cm 土层，对于浅层 0—40 cm，N、M 处理土层硝态氮相对累积量相近，且均比 CK 处理高，在 40—80 cm 土层则逐渐呈现相反的规律，在 60—80 cm 土层中，CK 土壤硝态氮相对累积量比 N、M 处理均高。整体来看，随着黄豆生育期的后移，土壤硝态氮相对累积量表层(0—20 cm)占比逐渐降低，浅中层(20—40 cm)占比先增加后降低，后续土层(40—120 cm)占比逐渐提高，特别是成熟期(60—80 cm)土层占比提高最为明显，硝态氮相对累积由浅层到中深层(0—120 cm)呈现逐渐下移且各土层占比分布逐渐均衡的趋势。

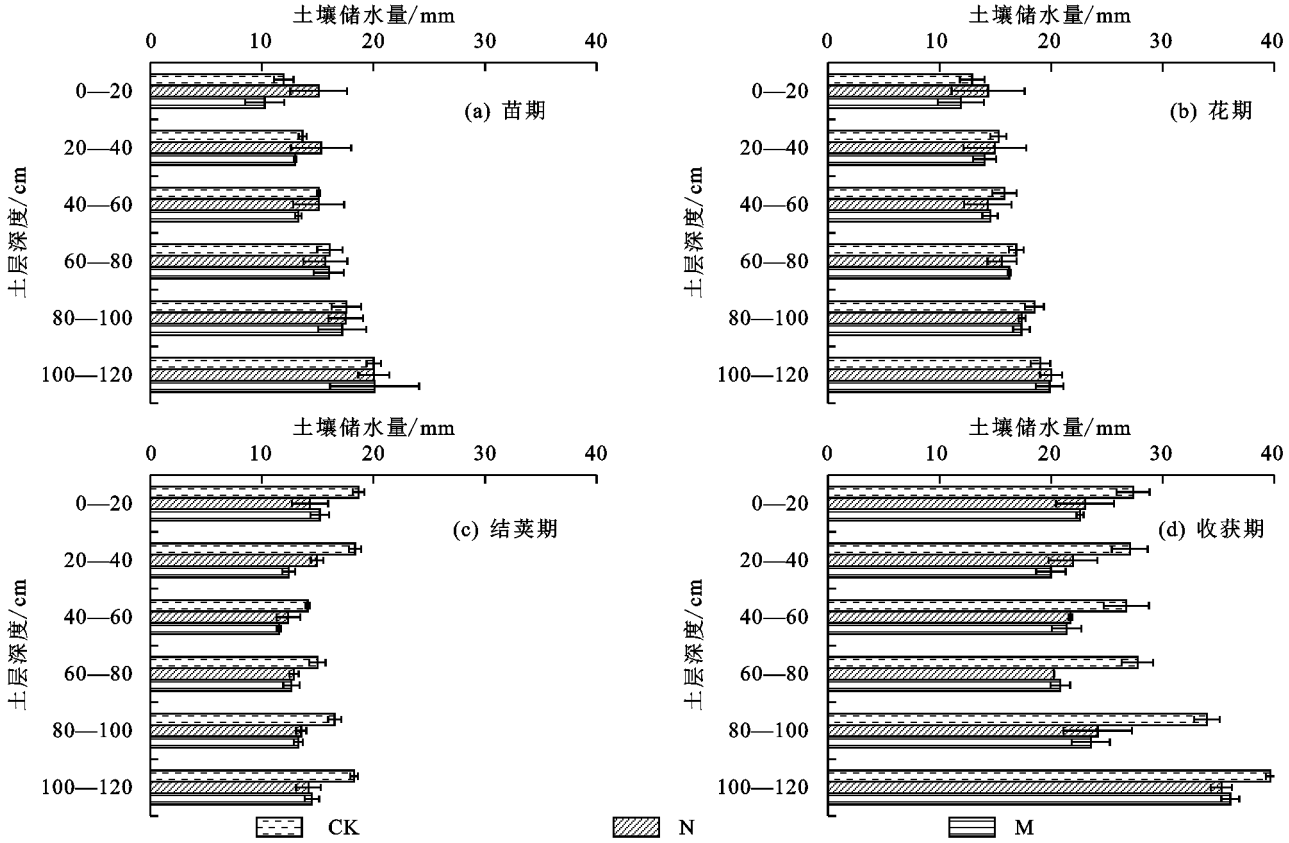

图 4 不同时期不同土层土壤储水量

表 1 各处理不同生育期 0—120 cm 土壤储水量

单位：mm

处理	苗期	花期	结荚期	收获期
CK	94.45±4.16a	98.43±1.35a	100.92±2.56a	183.55±7.18a
N	98.79±12.42a	96.59±8.84a	82.24±5.20b	146.43±0.93b
M	89.87±5.36a	93.91±1.91a	79.59±1.71b	144.41±3.08b

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 2 不同生育期与 CK 相比平均土壤储水量亏缺度

处理	苗期	花期	结荚期	收获期
N	0.046	−0.019	−0.185	−0.202
M	−0.048	−0.046	−0.211	−0.213

注：负值和正值分别表示储水量亏缺和增加。

计算各处理 0—120 cm 土层土壤总硝态氮绝对累积量(表 3)表明，在 CK、N、M 处理的苗期和结荚期，土壤总硝态氮绝对累积量在各处理间未表现出显著差异，而在黄豆花期 CK、N、M 处理对 0—120 cm 土壤养分消耗的程度不同使土壤总硝态氮绝对累积量表现出显著差异，而在收获期 N、M 处理土壤总硝态氮绝对累积量不存在显著差异，但与 CK 处理间存在显著差异。

2.3 不同处理对果树叶片含氮量和基径增量的影响

在黄豆的苗期、花期、结荚期、收获期，果树中上部随机选取成熟叶片经过试验处理后得到不同处理下果树叶片含氮量。由图 6 可知，间作处理整体来看提升果树叶片含氮量，苗期 N、M 处理较 CK 分别提升 5.78%和 5.14%，苗期由于黄豆植株较小，2 种间作密度对果树叶片含氮量提升程度相近；在进入花期后，N 处理对果树含氮量提升 7.83%，而 M 处理提升 2.42%，中密度间作对果树叶片含氮量提升展现出优势；结荚期 N 处理对果树叶片含氮量提升程度降低，仅有 3.37%，而 M 处理则直接转变为叶片含氮量降低 2.73%，在黄豆进入结荚期以后，为满足自身需求减少

对果树叶片氮素的贡献;在进入成熟期黄豆自身生长基本完成后,对果树叶片氮含量重新表现为促进作用,N、M 处理果树叶片含氮量分别提升 8.04%,5.14%。

基径可以评价果树整个生育期生长变化差异,在各处理选取试验小区内 3 棵果树进行整个生育期前后基径生长变化统计,并计算提升比。由表 4 可知,2 种间作处理较对照均促进果树的生长,高密度间作提升程度更高,间作黄豆可以有效促进果树树干加粗生长。

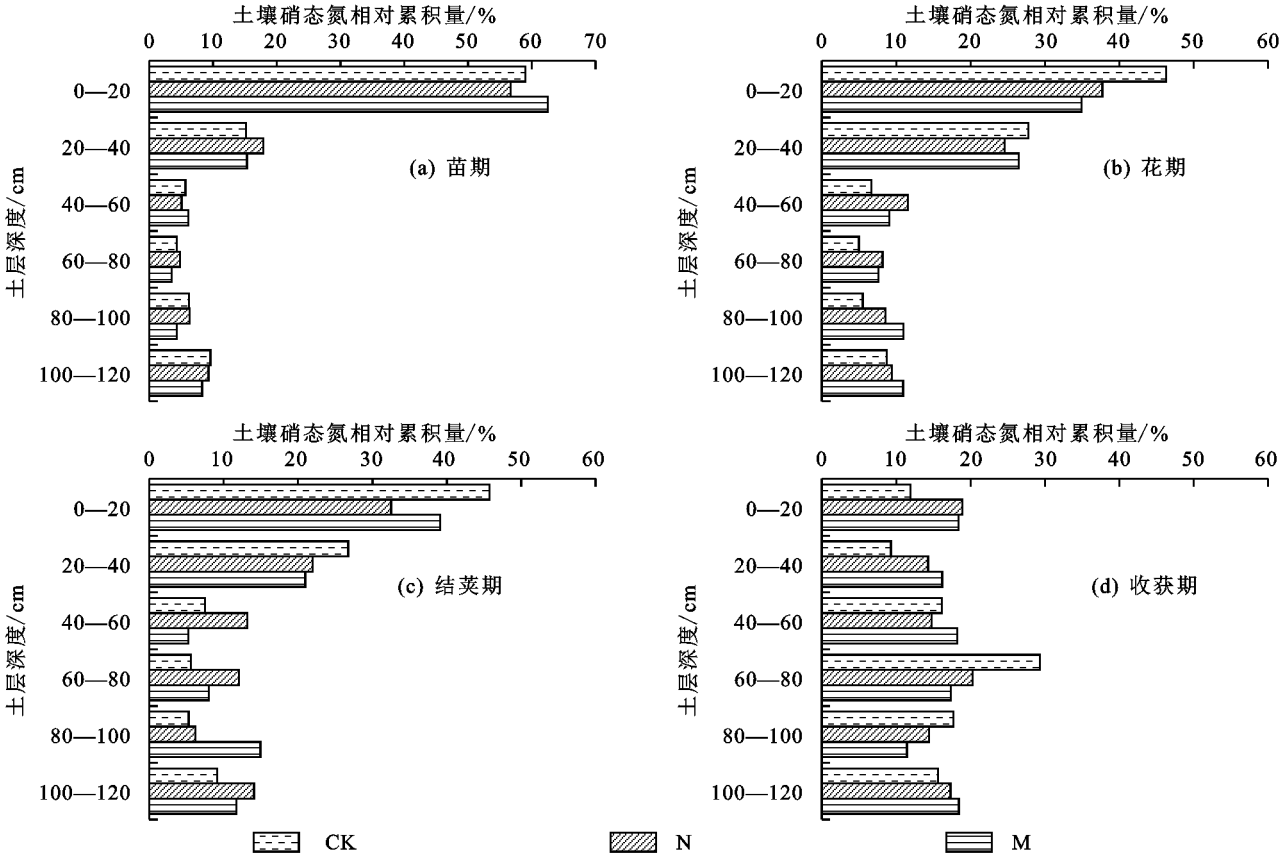

图 5　不同时期不同土层土壤硝态氮相对累积量

表 3　各处理不同生育期 0－120 cm 土层土壤总硝态氮绝对累积量　　单位:kg/hm²

处理	苗期	花期	结荚期	收获期
CK	10.10±3.73a	16.64±0.11a	14.80±0.36a	16.72±1.2a
N	8.51±2.13a	4.22±0.17c	6.75±2.64a	7.61±0.46b
M	8.49±4.25a	11.23±1.65b	9.95±3.72a	9.48±1.86b

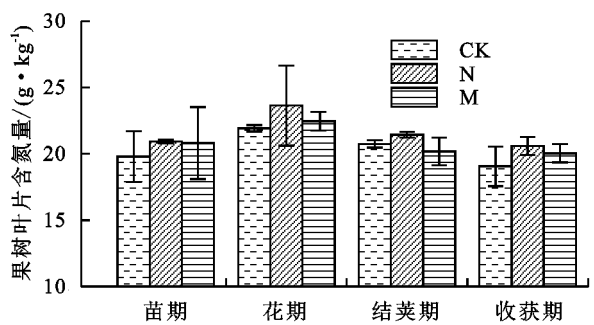

图 6　不同时期各处理果树叶片含氮量

3　讨　论

在干旱半干旱地区,土壤水分和速效氮含量是影响作物生长和生产力的关键因素[17-20]。本研究中,与对照相比,2 种间作密度下苹果树垂直剖面土壤水分在苗期、花期表现出一定的提升作用,中密度间作花期前在 0—60 cm 土层表现出土壤水分提升作用,而高密度间作只在苗期展现出土壤水分提升作用,统计当地 5,6,7 月平均降雨量分别为 37.3,19.2,25.6 mm。可以看出,在黄豆花期前,果园降雨量较少,行间作物为果树开花坐果创造良好的水分环境,中密度间作在此阶段对果园蓄水保墒效果更为明显;8 月后当地降雨平均达到 70 mm 以上,土壤水补给增加,但是黄豆进入结荚期后耗水量逐渐提升,行间作物与果树水分竞争加剧,间作黄豆显著降低果园 0—80 cm 储水量。前人研究[1,21-22]表明,农林复合系统种间水分利用在空间上也存在互补性,黄豆花期后主要利用行间 0—80 cm 土壤水,而果树则倾向于利用更深层的土壤水[21]。行间作物覆盖有效抑制土壤无效蒸发,将更多的降水储存在土壤中,为苹果树提供充足的水分。此外,农林复合系统自身小气候调节能力有效缓解干旱缺水(5—7 月)对果树的不利影响,这与 Bai 等[22]和霍高鹏等[1]的研究结果一致。

对不同生育期黄豆 2 种间作密度下土壤硝态氮

绝对累积量(表 3)分析表明,在 2 种间作密度下,所有的间作土壤硝态氮累积量生育期内都低于单作,但是间作与单作的不同生育期土壤硝态氮变化规律不同,中密度间作表现为花期前养分消耗,花期后逐渐补充,而高密度间作则表现为苗期消耗,花期补充,花期后再消耗。黄豆苗期生长对土壤水分的提升以及养分的消耗规律在 2 种间作密度处理中相一致,但是在黄豆进入开花结荚期后,中密度间作持续保持着对土壤养分的补充,而高密度间作在结荚期后为满足自身的生长对土壤养分进一步消耗。有研究[23]表明,不同种植密度的黄豆在不同生育期同果树之间发生生长资源的再分配,密度增加导致种内竞争的产生和加剧,从而影响植物的单株生长量和土壤硝态氮累积量,这与冯银平等[24]在研究不同密度种植苜蓿时得出的结果基本一致。从土层硝态氮相对累积分布来看,高密度间作黄豆虽然提升浅层硝态氮含量的效果更好,综合考虑整个时期的耗水情况及花期后对土壤养分的消耗加剧,中密度间作虽然对土壤硝态氮含量提升有限,但在整个研究期表现出优的蓄水保墒能力,更适合较为干旱的黄土高原。

表 4 不同密度间作处理下果树基径生长变化

处理	T1			T2			T3		
	初始值/mm	最终值/mm	提升比/%	初始值/mm	最终值/mm	提升比/%	初始值/mm	最终值/mm	提升比/%
CK	72.89	77.99	—	70.35	76.39	—	78.62	84.99	—
N	63.98	70.03	18.75	52.52	58.89	5.26	81.49	89.76	30.00
M	77.67	86.26	68.75	64.62	71.62	15.70	68.12	77.99	55.00

氮肥是果树合成氨基酸不可缺少的元素,可以促进果树树干加粗和树冠扩大,间作黄豆以绿肥的形式代替传统氮肥可以降低果园施肥成本,避免多年施肥引起的深层硝态氮累积[25-26]。间作处理后果树叶片含氮量明显提高,虽然结荚期高密度间作对果树叶片氮含量表现出负面影响,但整体间作对果树叶片氮含量表现为促进作用。冯晓敏等[27]在研究花生和燕麦间作时发现,间作燕麦生物量整个生育期高于单作,间作豆科作物可以有效促进非固氮作物的生长,本研究中果树各处理基径生长对比结果表明,间作豆科作物可以有效促进果树生长。对于间作黄豆而言,本研究对 2 种间作条件下的黄豆与当地单作黄豆的产量及生物量(表 5)比较发现,果园间作黄豆较单作黄豆单株产量及生物量有一定程度的降低,种间竞争使固氮作物自身生长发育受到一定程度的影响,高密度间作受到的影响更大,但农林复合能够有效提高果园土地利用效率,促进产能提升,达到充分利用光、温、水、肥等资源的目的[28]。间作在提高土地资源利用效率的同时促进果园幼龄果树树干的增粗,为后续开花坐果提供良好的水分养分通道。许华森等[29]的研究也表明,不同的间作存在不同程度的竞争关系,但间作都存在生态位差异,因而有间作优势。

表 5 2021 不同密度间作黄豆产量及生物量

处理	总产量/($kg \cdot hm^{-2}$)	单株产量/g	总生物量/($kg \cdot hm^{-2}$)	单株生物量/g
单作黄豆	1504.30	16.71	6339.60	70.44
N	1349.33	14.99	5963.40	66.26
M	2482.35	13.79	10692.00	59.40

4 结 论

(1)果园间作黄豆对 0—80 cm 土壤水分影响较大,且与生育期密切相关,中密度间作显著提升苗期和花期的土壤水分,高密度间作则表现为更多的消耗;结荚后 2 种处理条件下均大量消耗果树行间水分。中、高密度处理下土壤储水量在苗期和花期未表现出显著差异,水分亏缺度较低;而结荚期和收获期,中、高密度处理土壤储水量显著低于对照,结荚以后间作出现储水量亏缺加剧的现象。

(2)果园间作黄豆对土壤硝态氮累积量的影响表现为土壤硝态氮相对累积量随黄豆生育期呈现逐渐下移且分布逐渐均衡的趋势,但土壤总硝态氮绝对累积量处理间未表现出显著差异,间作黄豆对土壤养分的改良是一个相对长期的过程。

(3)2 种间作均可有效提高果树叶片氮含量,促进果树生长,高密度种植在结荚后与苹果树产生强烈的水分竞争及对果树叶片含氮量的减少,综合评价中密度间作在黄土高原更有间作优势。

参考文献:

[1] 霍高鹏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区枣农复合系统土壤水分利用与竞争[J].自然资源学报,2017,32(12):2043-2054.

[2] 唐夫凯,齐丹卉,卢琦,等.中国西北地区农林复合经营的保护与发展[J].自然资源学报,2016,31(9):1429-1439.

[3] 王延平,韩明玉,张林森,等.陕西黄土高原苹果园土壤水分分异特征[J].林业科学,2013,49(7):16-25.

[4] Li P F, Chen J N, Zhao G J, et al. Determining the drivers and rates of soil erosion on the Loess Plateau since 1901[J]. Science of the Total Environment, 2022, 823: e153674.

[5] Huang X H, Wang L L, Lu Q. Vulnerability assess-

ment of soil and water loss in Loess Plateau and its impact on farmers' soil and water conservation adaptive behavior[J].Sustainability,2018,10(12):1-17.

[6] 袁和第,信忠保,侯健,等.黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式[J].生态学报,2021,41(16):6398-6416.

[7] 何娜娜,贾如浩,叶苗泰,等.黄土高原旱地苹果园油菜间作对土壤大孔隙结构的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):259-264.

[8] 刘颖,张佳蕾,李新国,等.豆科作物氮素高效利用机制研究进展[J].中国油料作物学报,2022,44(3):476-482.

[9] 柯丹霞,徐勤朕,杨娜,等.高氮抑制豆科植物结瘤固氮机制研究进展[J].生物技术通报,2019,35(10):40-45.

[10] 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):688-695.

[11] Maren O R P, Naresh V T, Andrew M G, et al. Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system[J]. Agroforestry Systems,2006,68(1):27-36.

[12] 张超,张海,翟辉,等.黄土高原不同坡位苹果园土壤生物学特征:以陕西省淳化县为例[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):95-101,135.

[13] Catherine M B, Joel L S. Symbiotic nitrogen fixation by rhizobia: The roots of a success story[J].Current Opinion in Plant Biology,2018,44:7-15.

[14] Zhao L H, Gao X D, He N N, et al. Ecohydrological advantage of young apple tree-based agroforestry and its response to extreme droughts on the semiarid Loess Plateau[J].Agricultural and Forest Meteorology,2022,321:e108969.

[15] Wang C B, Zheng Y M, Shen P, et al. Determining N supplied sources and N use efficiency for peanut under applications of four forms of N fertilizers labeled by isotope N-15[J]. Journal of Integrative Agriculture,2016,15(2):432-439.

[16] 马鹏毅,赵家锐,何威明,等.黄土高原不同树龄苹果园土壤水分及硝态氮剖面特征[J].水土保持学报,2019,33(3):192-198.

[17] Li W X, Li L, Sun J H, et al. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2004,105(3):483-491.

[18] 王绍飞,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区盛果期苹果树土壤水分利用策略[J].林业科学,2018,54(10):31-38.

[19] 张丽娜,李军,范鹏,等.黄土高原半干旱区不同密度山地苹果园水分生产力模拟[J].应用生态学报,2013,24(10):2878-2887.

[20] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China[J]. Geoderma,2013,197/198:67-78.

[21] Yang M, Gao X D, Wang S F, et al. Quantifying the importance of deep root water uptake for apple trees' hydrological and physiological performance in drylands[J].Journal of Hydrology,2022,606:e127471.

[22] Bai W, Sun Z X, Zheng J M, et al. Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management,2016,178:281-290.

[23] 范鹏,李军,张丽娜,等.黄土高原苹果园地深层土壤氮素含量与分布特征[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):420-429.

[24] 冯银平,沈海花,罗永开,等.种植密度对苜蓿生长及生物量的影响[J].植物生态学报,2020,44(3):248-256.

[25] 赵帅翔,张卫峰,姜远茂,张福锁.黄土高原苹果过量施氮因素分析[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):484-491.

[26] 郭宏,刘天鹏,杜毅飞,等.黄土高原县域苹果园土壤养分空间变异特征研究[J].水土保持研究,2015,22(3):21-27.

[27] 冯晓敏,杨永,臧华栋,等.燕麦花生间作系统作物氮素累积与转移规律[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):617-624.

[28] 樊吴静,唐美丽,韦玉恒,等.种植密度对旱藕生理特性、产量及品质的影响[J].南方农业学报,2020,51(9):2130-2137.

[29] 许华森,毕华兴,高路博,等.晋西黄土区果农间作系统根系生态位特征[J].中国农学通报,2013,29(24):69-73.