李凯,王湛,罗世武,等.西北旱作区谷子轮作提升作物生产力及土壤肥力[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(4):57-66.
Li K, Wang Z, Luo S W, et al. The implementation of millet rotation in the dryland farming regions of Northwest China contributes to improved crop productivity and enhanced soil fertility[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(4):57-66.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202503012

西北旱作区谷子轮作提升作物生产力及土壤肥力

李凯,王湛*,罗世武,杨军学,王勇,张建彤

(宁夏农林科学院 固原分院,宁夏 固原 756000)

摘　要:[目的]谷子是旱作区重要作物,但因对谷子经济效益最大化的追求,谷子连作障碍问题已非常突出,严重制约产业可持续发展。探明不同轮作模式对谷子生长特性及土壤肥力的影响,可为提升谷子产能和土壤可持续利用提供理论依据。[方法]于2021—2022年连续2年进行试验,以谷子连作3年(M—M)为对照,设置玉米—谷子(C—M)、马铃薯—谷子(P—M)、高粱—谷子(S—M)、糜子—谷子(B—M)4种轮作模式,测定不同轮作模式下土壤全量和速效养分的变化,综合评价不同轮作模式土壤肥力变化对谷子生长、产量和经济效益的影响。[结果]与连作(M—M)相比,各轮作模式下谷子茎粗增加6.33%~14.02%,穗长增加4.69%~18.41%,叶面积指数显著提高24.49%~47.96%。轮作与连作后,谷子产量依次为S—M>P—M>B—M>C—M>M—M,其中P—M和S—M轮作模式较M—M分别显著增产19.00%、19.27%,主穗重与产量变化趋势一致。从2年的土壤养分均值来看,轮作模式均提高了土壤的有机质、全氮、速效磷和速效钾含量,其中S—M模式有机质含量显著增加43.02%,C—M、P—M和S—M模式全氮含量分别显著增加46.89%、47.27%、59.53%,土壤肥力的综合评分依次为P—M>S—M>C—M>M—M>B—M。2年的经济效益分析表明,与M—M相比,P—M和S—M轮作模式总产值、纯收入、产投比分别增加23.36%、24.29%、1.75%和10.91%、15.78%、11.95%。[结论]马铃薯—谷子和高粱—谷子2种轮作模式改善土壤生态环境效果明显,提高了土壤肥力,谷田综合生产力明显提升,可促进西北旱作区谷子产业的可持续发展。

关键词:谷子; 轮作; 土壤肥力; 产量
中图分类号:S515　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)04-0057-10

The implementation of millet rotation in the dryland farming regions of Northwest China contributes to improved crop productivity and enhanced soil fertility

Li Kai, Wang Zhan*, Luo Shiwu, Yang Junxue, Wang Yong, Zhang Jiantong

(*Guyuan Branch, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Guyuan, 756000, China*)

Abstract: [Objective] Foxtail millet (*Setaria italica* L.) is a staple crop in Northwest China's arid regions, where continuous cropping has led to severe yield decline and sustainability challenges. This study aimed to investigate the effects of various crop rotation patterns on millet growth characteristics and soil fertility, to support sustainable intensification of dryland farming systems. [Methods] A two-year field experiment (2021-2022) compared four 2-year rotation systems, including corn-millet (C-M), potato-millet (P-M), sorghum-millet (S-M), and broomcorn-millet (B-M) against continuous millet monoculture (M-M, control). Changes in soil nutrient dynamics (including organic matter, total N, and available P/K), millet growth parameters (including stem diameter, panicle length, and LAI), and yield components and economic returns were analyzed. [Results] Compared to M-M control, rotation systems significantly improved the stem diameter by 6.33% to 14.02%, panicle length by

收稿日期:2025-03-11　　**修回日期**:2025-06-24
基金项目:宁夏回族自治区优秀青年基金项目(2022AAC05048);国家现代农业产业技术体系(CARS-06-14.5-A18);中央引导地方科技发展专项(2024FRD05091);宁夏农业科技自主创新专项(NNKZZCGZH-2023-02;NKYG-25-17);小杂粮种质资源鉴评及优质抗逆新品种选育(2024FRD05091)
作者简介:李凯(ORCID:0009-0009-8232-7552),助理研究员,硕士,研究方向:小杂粮栽培与育种
*通信作者:王湛,副研究员,博士,E-mail:wzyjsjt@163.com

4.69% to 18.41%, and leaf area index by 24.49% to 47.96%. Yield hierarchy followed the order of: S-M>P-M>B-M>C-M>M-M. Notably, P-M and S-M rotation systems significantly enhanced yield by 19.00% and 19.27%, respectively. From an analysis of average soil nutrient values over two years, all rotation patterns resulted in increased soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium contents. Among these patterns, the S-M rotation notably elevated organic matter content by 43.02%, while total nitrogen levels rose significantly for C-M, P-M, and S-M, with increases of 46.89%, 47.27%, and 59.53%, respectively. The comprehensive soil fertility scores followed this order: P-M>S-M>C-M>M-M>B-M. The two-year economic benefit analysis indicated that, compared with continuous cultivation (M-M), the P-M and S-M rotation modes increased the total output value, net income and yield-investment ratio by 23.36%, 24.29%, 1.75%, and 10.91%, 15.78%, 11.95%, respectively. [Conclusion]The potato-millet (P-M) and sorghum-millet (S-M) rotation patterns significantly improved the soil's ecological environment, enhanced soil fertility, boosted overall grain field productivity, and promoted the sustainable development of the millet industry in the arid farming areas of Northwest China.

Keywords: Foxtail Millet, Crop rotation systems, Soil fertility, Yield improvement

谷子[*Setaria italica*(L.)Beauv]是起源于中国的传统粮食作物,具有悠久的栽培历史,其耐瘠薄、抗旱性强的特点使得谷子成为旱作地区产业结构调整的主栽作物[1-2]。宁夏位于西北内陆高原,属典型的大陆性气候,干旱少雨,谷子种植主要分布在宁夏中部干旱带和南部山区,属于西北春谷区,种植面积常年稳定在30万亩左右[3]。但随着对谷子经济效益的最大化追求,同一地块连年种植谷子而引起的连作障碍问题已经非常突出[4],也已成为制约当地谷子产业可持续发展的主要因素。

诸多研究表明,轮作等农业措施是缓解连作障碍的最健康和有效的途径之一,合理轮作能够促进土壤养分的均衡利用,改善土壤生态环境,并提高作物产量[5-9],而土壤生态系统的变化也是导致谷子连作障碍形成的重要原因[10]。牛倩云等[11]发现大豆-马铃薯-谷子轮作能改善谷田生态环境,提高土壤有机质和速效养分含量,使谷子产量较连作显著增加37.11%,进而有效缓解连作障碍的发生。王仪明等[12]发现,苜蓿-青贮玉米轮作中土壤有机质、速效氮和速效钾含量分别增加了60.79%、110.84%和160.02%。李洋等[13]发现,小麦—花生和小麦—大豆轮作能够明显增加土壤中的速效氮含量,并且保持小麦产量稳定提升。张成君等[14]研究表明,在西北半干旱区,不同轮作模式对土壤养分具有显著影响,其中玉米-豌豆和马铃薯-燕麦轮作模式提高了土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾含量。李丹等[15]研究谷子不同轮作模式对土壤理化性质及细菌群落时发现,不同轮作模式对土壤质量有一定影响,其中土壤全氮、有机质含量提高程度因模式而异,玉米是避免谷子连作障碍较为适宜的作物,但在西北旱作区其它生态条件下的谷田是否适用,尚不清楚。

目前,旱作区轮作制度的研究大多数集中在单一轮作种植模式对作物生长及土壤环境影响,而西北旱作区多种主要粮食作物与谷子进行年际间轮作对土壤肥力、作物生长特性及产量等方面综合影响的相关报道仍然较少。因此,本试验以宁夏旱作区优势抗旱作物谷子为研究对象,采用谷子与不同主栽作物年际间轮作的模式,探究谷子不同轮作模式下土壤养分2年间的变化,以及轮作后对谷子生长特性、产量、经济效益的影响,旨在缓解连作障碍引起的土壤肥力失衡,并为优化谷子轮作模式提供理论依据,从而指导西北旱作区谷子产业可持续绿色发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试谷子品种为'张杂谷13号',由河北巡天种业公司提供;玉米品种为'赛博159',由河北垦丰农业科技有限公司提供;马铃薯品种为'青薯9号',由海原县恒兴马铃薯专业合作社提供;高粱品种为'晋牧4号,'由山西农业大学高粱研究所提供;糜子品种为'固糜21号',由宁夏农林科学院固原分院提供。覆盖材料为渗水地膜,宽1650 mm、厚0.01 mm,由山西微通渗水膜生物科技有限公司提供。

1.2 试验区概况

试验在宁夏回族自治区中卫市海原县贾塘乡王塘村(36°52′ N、105°90′ E)进行,该地区属中温带半干旱大陆性季风气候,海拔1750 m,年平均降雨量为305.3 mm,平均气温15.6 ℃,≥10 ℃积温

为2550～2700 ℃。试验区土质为黄绵土,前茬作物为谷子,土壤基本理化性质为:pH=8.08,有机质含量10.44 g/kg,全氮含量0.737 g/kg,速效氮含量40.89 mg/kg,全磷含量0.59 g/kg,速效磷含量13.88 mg/kg,全钾含量18.25 g/kg,速效钾含量162 mg/kg。试验期间即2021和2022年作物生育期降雨量分别为176.7、353.8 mm,作物生育期气象条件见图1。

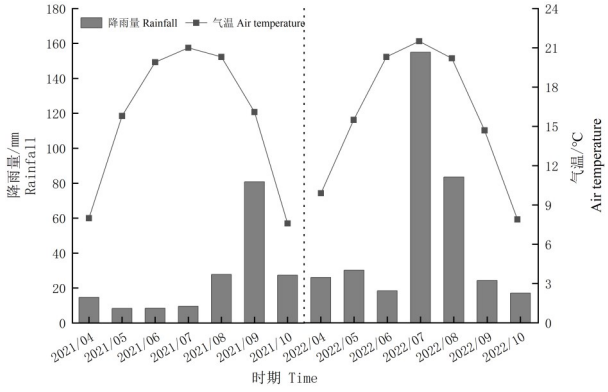


图1　2021-2022年作物生育期气象条件

Fig.1　Meteorological conditions during the growth period in 2021 and 2022

1.3　试验设计

以谷子连作3年为对照(M-M),设置玉米—谷子(C-M)、马铃薯—谷子(P-M)、高粱—谷子(S-M)、糜子—谷子(B-M)4种轮作模式,共计5个处理。2021年(第1年)种植作物分别为谷子、玉米、马铃薯、高粱、糜子,2022年(第2年)种植作物全部为谷子。每个处理3次重复,随机区组设计,每个小区面积6 m×5 m。

各类作物种植方式均为地膜覆盖波浪式穴播。谷子于2021年4月18日和2022年4月25日播种,播种量7.5 kg/hm^2,种植密度30万株/hm^2;玉米于2021年4月28日播种,播种量30 kg/hm^2,种植密度8.5万株/hm^2;马铃薯于2021年5月3日播种,播种量3000 kg/hm^2,种植密度5.25万株/hm^2;高粱于2021年4月25日播种,播种量22.5 kg/hm^2,种植密度8.25万株/hm^2;糜子于2021年5月15日播种,播种量22.5 kg/hm^2,种植密度90万株/hm^2。结合春季整地统一施完全腐熟的优质农家肥30 000 kg/hm^2、尿素180～225 kg/hm^2、过磷酸钙120～150 kg/hm^2、硫酸钾75～90 kg/hm^2,各类作物其它田间管理采用常规管理。

1.4　测定指标与方法

1.4.1　谷子农艺性状

在种植第2年谷子成熟期,每个小区随机选取生长均匀一致的谷子20株,测定株高、茎粗(地上第2节的粗度)、穗长、倒二叶(旗叶以下数第二片叶子)叶长和叶宽。并通过计算叶面积,进一步求得叶面积指数(LAI)。

1.4.2　谷子产量及产量性状

在种植第2年谷子收获期,按照小区全部收获并脱粒、晒干、称重,每个小区随机选取生长均匀一致的谷子20株进行室内考种,按照常规方法测定千粒重、主穗粒重、主穗重。

1.4.3　土壤养分指标

在各类作物种植第1年与第2年的成熟期,每个小区采用五点采样法收集土壤样品,采样深度0～20 cm,去除大块石砾、植株残根等杂质后,将5个点的土样混合均匀,取1 kg土,风干后过1 mm筛,测定土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾含量。

土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定;土壤全氮含量采用凯氏蒸馏法测定,速效氮含量采用碱解扩散法测定;土壤全磷含量用高氯酸消解-钼锑抗比色法测定,速效磷含量采用碳酸氢钠浸提分光光度计法测定;土壤全钾含量用氢氧化钠熔融-火焰光度计法测定,速效钾含量采用乙酸铵浸提火焰光度计法测定[16]。

1.4.4　综合评价方法

参考王仪明等[12]的方法将原始变量设为p个,分别为$X_1,X_2,\cdots,X_p$,将主成分看作因变量,原始变量X看作自变量,对其进行线性组合得到相应的主成分数学模型:

$$F_1=a_{11}X_1+a_{12}X_2+\cdots+a_{1p}X_p$$

$$F_2=a_{21}X_1+a_{22}X_2+\cdots+a_{2p}X_p$$

$$\cdots$$

$$F_p=a_{p1}X_1+a_{p2}X_2+\cdots+a_pX_p$$

称$F_1,F_2,\cdots,F_P$分别为第1、第2、…、第p个主成分;系数向量$(a_{1j},a_{2j},\cdots,a_{pj})$,$(j=1,2,\cdots,p)$是协方差阵的特征值$(\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\lambda_p)$所对应的特征向量,且$F_1,F_2,\cdots,F_p$的方差是上述的特征值,主成分的名次按特征值大小的顺序进行排列。

第i主成分的贡献率为$\lambda_i/\sum\lambda_i$,表明第i个主成分综合$X_1,X_2,\cdots,X_p$的信息的能力。

1.4.5 经济效益计算方法

经济效益分别按照作物成本、产值、总成本、总产值、纯收入、产投比计算[17]。

作物成本(元/hm²)=种子成本(元/hm²)+肥料成本(元/hm²)+地膜成本(元/hm²)+机械成本(元/hm²)+田间管理成本(元/hm²),各类成本均为试验当年成本

作物产值(元/hm²)=作物产量(kg/hm²)×作物价格(元/kg),作物产值为试验当年产值

总成本(元/hm²)=种植第1年的作物成本(元/hm²)+种植第2年的作物成本(元/hm²)

总产值(元/hm²)=种植第1年的作物产值(元/hm²)+种植第2年的作物产值(元/hm²)

纯收入(元/hm²)=总产值(元/hm²)-总成本(元/hm²)

产投比=总产值(元/hm²)/总成本(元/hm²)

1.5 数据处理与分析

采用Excel 2007软件进行数据汇总,利用DPS 7.05软件进行方差分析和因子分析,采用新复极差法进行多重比较。利用OriginPro 2021软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同轮作模式下谷子农艺性状

由表1可见,不同处理下谷子成熟期的株高在88.03~104.50 cm,C-M和B-M处理均显著高于其它处理($P<0.05$),P-M和S-M处理与M-M处理无显著差异($P>0.05$)。轮作模式下谷子茎粗和穗长分别比M-M高6.33%~14.02%、4.69%~18.41%,但各处理间无显著差异($P>0.05$),其中B-M茎粗最高,为9.19 mm,P-M穗长最高,为24.51 cm。轮作模式下谷子叶长和叶宽均高于M-M,其中C-M叶长较M-M显著增加23.76%,C-M、S-M和B-M叶宽较M-M分别显著增加19.27%、26.45%、26.34%($P<0.05$)。叶面积指数各处理高低依次为C-M>B-M>S-M>P-M>M-M,各轮作模式较M-M显著提高24.49%~47.96%($P<0.05$)。

表1 不同轮作模式对谷子农艺性状的影响

Table 1 Effects of different crop rotation patterns on agronomic traits of millet

处理 Treatments	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	穗长/cm Spike length	叶长/cm Leaf length	叶宽/mm Leaf width	叶面积指数 Leaf area index
C−M	102.87±1.25a	8.81±0.77a	23.11±0.75a	35.11±1.64a	30.57±1.06a	1.45±0.04a
P−M	88.03±5.11b	8.57±0.03a	24.51±0.72a	28.67±1.35ab	29.15±1.19ab	1.22±0.01b
S−M	93.93±5.74b	8.58±0.88a	22.42±1.05a	31.04±1.53ab	32.41±0.63a	1.36±0.08ab
B−M	104.50±4.27a	9.19±0.89a	21.67±0.32a	31.37±1.33ab	32.38±0.53a	1.38±0.06a
M−M	91.33±3.52b	8.06±0.57a	20.70±1.22a	28.37±1.06b	25.63±0.32b	0.98±0.04c

注:C−M为玉米−谷子;P−M为马铃薯−谷子;S−M为高粱−谷子;B−M为糜子−谷子;M−M为谷子−谷子;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: C−M is corn−millet; P−M is potato−millet; S−M is sorghum−millet; B−M is broomcorn−millet; M−M is millet−millet; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).

2.2 不同轮作模式下谷子产量性状及产量

不同轮作模式对谷子产量及产量性状的影响见表2。各处理下谷子的产量大小依次为S-M>P-M>B-M>C-M>M-M,其中P-M和S-M处理均显著高于其它处理($P<0.05$),分别较M-M处理增产19.00%、19.27%,C-M和B-M与M-M差异不显著($P>0.05$)。从谷子产量相关性状可以看出,谷子主穗粒重和籽粒千粒重各处理间差异不显著($P>0.05$),而主穗重与产量的变化趋势表现一致,说明轮作模式下谷子主穗重可能对其产量有着显著的影响。

2.3 不同轮作模式下土壤养分含量

2.3.1 不同轮作模式下土壤有机质含量

由图2可见,种植第1年各处理土壤有机质含量依次为S-M>C-M>P-M>B-M>M-M,其中S-M和C-M处理分别较M-M处理显著增加54.55%、28.68%($P<0.05$),P-M和B-M处理与M-M处理差异不显著($P>0.05$);第2年C-M、P-M和S-M处理土壤有机质含量均显著高于其它处理,与M-M处理相比分别显著增加34.45%、39.49%、30.25%($P<0.05$),B-M与M-M差异不显著($P>0.05$)。各轮作模式下土壤有机质含

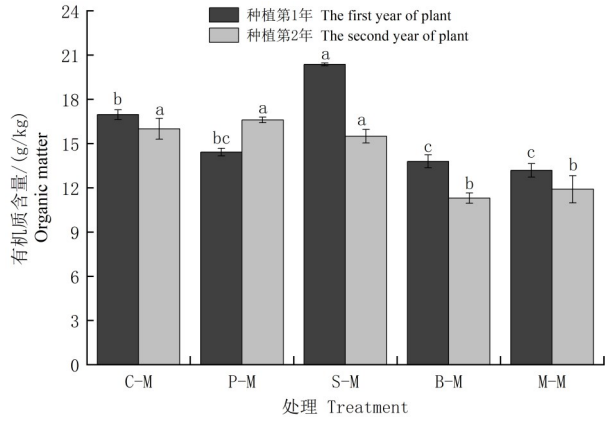
表2　不同轮作模式下谷子产量性状及产量

Table 2　Effects of different crop rotation patterns on yield traits and yield of millet

处理 Treatments	主穗粒重/g Main spike grain weight	主穗重/g Main spike weight	千粒重/g 1000-grain weight	产量/(kg/hm²) Yield
C-M	18.39±0.72a	26.88±2.02b	3.03±0.11a	6 376.05±90.32b
P-M	19.12±0.43a	29.38±1.13a	3.09±0.07a	7 542.34±88.74a
S-M	22.39±0.78a	29.92±0.75a	3.09±0.04a	7 559.37±102.80a
B-M	20.84±0.04a	26.79±1.05b	3.05±0.01a	6 377.14±88.71b
M-M	17.79±0.61a	26.12±1.10b	3.03±0.05a	6 338.08±77.83b

注:C-M为玉米-谷子;P-M为马铃薯-谷子;S-M为高粱-谷子;B-M为糜子-谷子;M-M为谷子-谷子;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note:C-M is corn-millet; P-M is potato-millet;S-M is sorghum-millet; B-M is broomcorn-millet; M-M is millet-millet; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).



C-M为玉米-谷子;P-M为马铃薯-谷子;S-M为高粱-谷子;B-M为糜子-谷子;M-M为谷子-谷子;不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

C-M is corn-millet; P-M is potato-millet;S-M is sorghum-millet; B-M is broomcorn-millet; M-M is millet-millet; Different letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$)

图2　不同轮作模式下土壤有机质含量的变化

Fig.2　The changes of soil organic matter under different rotation patterns

量2年平均值依次为S-M>C-M>P-M>B-M,均高于M-M处理,增加0.04%~43.02%。

2.3.2　不同轮作模式下土壤全量养分含量

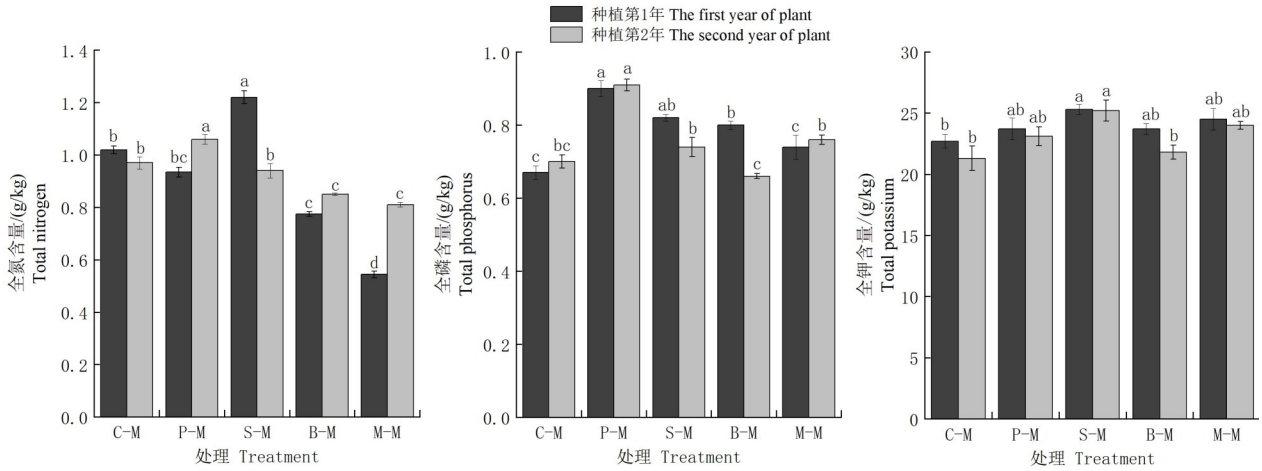
由图3可见,各处理土壤全氮含量2年平均值依次为S-M>P-M>C-M>B-M>M-M,其中C-M、P-M和S-M轮作模式较M-M分别显著提高46.89%、47.27%、59.53%($P<0.05$);种植第1年各轮作模式土壤全氮含量均显著高于M-M处理,增加42.28%~124.26%($P<0.05$),种植第2年C-M、P-M和S-M处理分别较M-M处理显著提高19.75%、30.86%、16.05%($P<0.05$)。各处理土壤全磷含量2年平均值依次为P-M>S-M>M-M>B-M>C-M,其中第1年P-M、S-M和B-M处理分别较M-M处理显著提高21.62%、10.81%、8.11%($P<0.05$),第2年P-M处理较M-M处理显著提高19.74%($P<0.05$)。各轮作模式土壤全钾含量种植第1、2年均与M-M处理差异不显著,其中S-M处理全钾含量最高,较M-M处理2年平均提高4.12%。

2.3.3　不同轮作模式下土壤速效养分含量

由图4可见,各处理土壤速效氮含量2年平均值依次为S-M>B-M>C-M>M-M>P-M,其中种植第1年S-M和B-M处理较M-M处理显著提高56.41%、43.34%($P<0.05$),种植第2年C-M和P-M处理较M-M处理显著提高14.71%、17.74%($P<0.05$)。轮作模式土壤速效磷含量平均值较M-M处理提高4.03%~88.66%,依次为S-M>P-M>C-M>B-M>M-M,其中种植第1年P-M和S-M处理较M-M处理显著提高142.55%、58.19%($P<0.05$),第2年S-M处理较M-M处理显著提高103.66%($P<0.05$)。土壤速效钾含量2年平均值依次为S-M>P-M>B-M>C-M>M-M,轮作模式较M-M处理提高1.19%~88.07%,其中第1年S-M处理较M-M处理显著提高111.38%($P<0.05$),第2年P-M和S-M处理分别较M-M处理显著提高47.98%、54.91%($P<0.05$)。

2.4　不同轮作模式对土壤肥力影响的综合评价

采用因子分析法,将谷子不同轮作模式下土壤养分中有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾含量7个指标依次作为自变量X_1~X_7,并进行因子分析。由表3可见,7个因子中,第1和

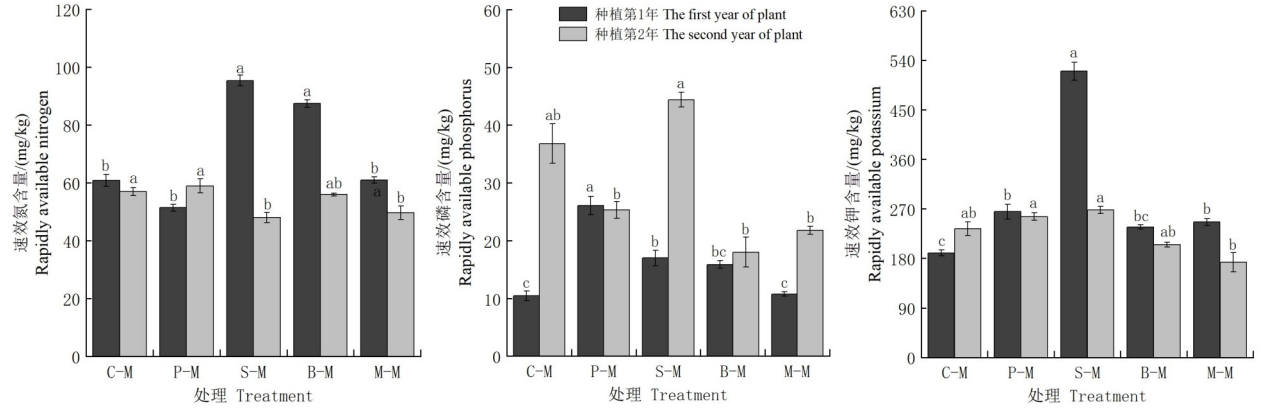


C－M为玉米－谷子;P－M为马铃薯－谷子;S－M为高粱－谷子;B－M为糜子－谷子;M－M为谷子－谷子;不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

C－M is corn－millet; P－M is potato－millet;S－M is sorghum－millet; B－M is broomcorn－millet; M－M is millet－millet;Different letters indicate significant difference among treatments($P<0.05$)

图3 不同轮作模式下土壤全量养分含量的变化

Fig.3 The changes of soil total nutrient content under different rotation patterns



C－M为玉米－谷子;P－M为马铃薯－谷子;S－M为高粱－谷子;B－M为糜子－谷子;M－M为谷子－谷子;不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

C－M is corn－millet; P－M is potato－millet;S－M is sorghum－millet; B－M is broomcorn－millet; M－M is millet－millet; Different letters indicate significant difference among treatments($P<0.05$)

图4 不同轮作模式下土壤速效养分含量的变化

Fig.4 The changes of soil available nutrient content under different rotation patterns

表3 因子分析的特征值与方差贡献率

Table 3 Eigenvalue and variance contribution rate of factor analysis

因子 Factors	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
第1因子 The first factor	0.962	0.942	0.715	0.228	0.258	0.687	0.868	52.39	52.39
第2因子 The second factor	0.136	0.310	－0.101	－0.969	0.901	0.569	－0.063	31.48	83.87

第2公因子累计贡献率达到83.87%,说明7个因子中绝大部分相关信息可由前2个公因子概括。

根据第1和第2公因子的特征值和贡献率计算综合分值并排序,由此得出谷子不同轮作模式和连作下土壤养分的综合评分。结果如表4所示,各处理排名依次为P-M、S-M、C-M、M-M、B-M。

表4　不同轮作模式因子得分与排序

Table 4　Factor scores and grade of different crop rotation patterns

处理 Treatments	因子1得分 Factor 1 score	因子1得分 Factor 2 score	综合得分 Composite score	排序 Grade
C－M	0.543	0.371	0.914	3
P－M	2.389	1.942	4.331	1
S－M	3.093	－2.016	1.077	2
B－M	－1.034	0.177	－0.857	5
M－M	－0.874	0.151	－0.723	4

注:C－M为玉米－谷子;P－M为马铃薯－谷子;S－M为高粱－谷子;B－M为糜子－谷子;M－M为谷子－谷子。

Note: C－M is corn－millet; P－M is potato－millet;S－M is sorghum－millet; B－M is broomcorn－millet; M－M is millet－millet.

除B-M模式外,其它轮作模式得分均高于连作,得分越高轮作模式优势更加突出,说明C-M、P-M和S-M模式改善土壤肥力的效果更佳。

2.5　不同轮作模式下经济效益分析

由表5可以看出,种植第1年和第2年各处理投入总成本为P-M＞C-M＞M-M＞S-M＞B-M;总产值和纯收入为P-M＞S-M＞M-M＞C-M＞B-M,其中P-M和S-M处理分别较M-M处理总产值增加23.36%、10.91%,纯收入增加24.29%、15.78%;产投比为S-M＞P-M＞M-M＞C-M＞B-M,P-M和S-M处理分别较M-M处理提高1.75%、11.95%。综上,在各轮作模式中,P-M和S-M这2种轮作模式在纯收入和产投比上较连作具有明显优势。

表5　不同轮作模式经济效益比较

Table 5　Comparison of economic benefits of different crop rotation patterns　　元/hm²

处理 Treatments	成本 Input		产值 Output value		总成本 Total input	总产值 Total output value	纯收入 Net income	产投比 Ratio of output to input
	第1年 The first year	第2年 The second year	第1年 The first year	第2年 The second year				
C－M	10 275	9600	19 716.51	38 256.30	19 875	57 972.81	38 097.81	2.92
P－M	13 650	9600	35 951.17	45 254.04	23 250	81 205.21	57 955.21	3.49
S－M	9 420	9600	27 654.16	45 356.22	19 020	73 010.38	53 990.38	3.84
B－M	8 850	9600	13 522.80	38 262.84	18 450	51 785.64	33 335.64	2.81
M－M	9 600	9600	27 801.90	38 028.48	19 200	65 830.38	46 630.38	3.43

注:C－M为玉米－谷子;P－M为马铃薯－谷子;S－M为高粱－谷子;B－M为糜子－谷子;M－M为谷子－谷子。

Note: C－M is corn－millet; P－M is potato－millet;S－M is sorghum－millet; B－M is broomcorn－millet; M－M is millet－millet.

3　讨论

土壤中有机质及氮磷钾是土壤肥力的物质基础,建立合理的轮作制度能够打破长期连作过程中土壤养分的失衡,促进土壤养分含量的积累和再循环利用[18-19]。孙倩等[20]研究发现,谷子与大豆轮作后,土壤中有机质、全氮、全磷和全钾含量均不同程度提高;左琴等[21]研究水稻与不同作物轮作表明,与水稻连作相比,各轮作模式下土壤的有机质、全磷、全钾、速效氮和速效钾含量均不同程度地增加;宋佳承等[22]在不同种植模式对土壤质量及马铃薯生长的影响研究中表明,马铃薯与藜麦、玉米轮作均增加了土壤中有机质、速效氮和有效磷含量。本试验通过研究不同轮作模式下土壤养分变化,发现轮作模式均不同程度提高了土壤的有机质含量,可能受轮作降低土壤中有机碳矿化速率的影响[23],并且土壤中全氮、速效磷和速效钾含量也增加,这与妙佳源等[24]研究中谷子轮作下土壤氮、磷含量较连作增加的结果基本一致。谷子连作条件下,土壤有机质、速效氮、全钾和速效钾含量均呈现下降趋势,土壤全氮和全磷含量增加,这与郝晓芬等[25]在谷子连作2年、3年和5年的研究中,发现土壤养分呈先下降后上升趋势的结论相反,主要原因可能是试验区基本以施氮肥和磷肥为主,轮作第1年降雨量仅为第2年的二分

之一,水分缺失抑制了土壤中氮磷全量养分的转换。本研究中,与玉米、马铃薯和高粱轮作后,谷田土壤的有机质和全氮含量显著增加,在高粱与谷子轮作模式下速效磷和速效钾的含量也显著增加,说明合理轮作后谷田土壤供应养分的能力明显有所提升。对土壤肥力进行综合评价,P-M、S-M、C-M轮作模式下土壤养分的综合评分均为正,而B-M轮作模式和谷子连作均为负。主要的原因可能是糜子和谷子同属一年生草本谷类作物,二者的土壤耕作层结构以及根系生长环境相似,导致糜子在改善土壤肥力环境方面有一定的局限性;而玉米和高粱具有发达的根系,马铃薯属块茎作物,这3种作物对土壤耕作层结构的改变影响着土壤养分的固定和转化,这与周旭东等[26]关于土壤结构的改变促进了作物对养分的摄入量的结论相似。

轮作是影响土壤质量的重要措施,且直接影响作物的生长状况和产量水平[27]。曹鑫鑫等[28]研究发现,轮作模式和有机肥配施有效提高了谷子各生育时期内的株高、抽穗/灌浆期植株的茎粗和营养生长阶段功能叶叶面积,有利于谷子植株的形态建成。李小霞等[29]研究发现,玉米-大豆-谷子、玉米-花生-谷子和玉米-马铃薯-谷子轮作模式下的谷子产量较连作显著增加3.07%~9.98%。本研究中,不同轮作模式不仅增加了谷子茎粗,还提升了叶面积指数,说明耕作制度的改变导致谷子农艺性状变化,由此为谷子生长后期主穗粒重与主穗重的增加提供了物质基础,进而最终实现P-M和S-M轮作模式下的谷子产量较连作显著提高。

不同轮作模式可以提升土壤质量和谷子产量,但农田整体的生产力也因为轮作作物的差异而不同。与谷子连作相比,轮作马铃薯、高粱的总体纯收入和产投比具有明显的优势,主要原因是马铃薯和高粱当年的产值高于其它作物,但生产成本差异较小,且经过轮作后,谷子生产力也明显提升。因此,在西北旱作区旱作农业的发展过程中,谷子与马铃薯和高粱短期轮作是实现谷子增产增效的重要轮作模式。

4 结论

本研究结果表明,不同轮作模式对谷子生长特性及土壤肥力有明显影响,通过谷田土壤肥力综合评价和经济效益比较可知,马铃薯—谷子和高粱—谷子2种轮作模式下,土壤肥力综合得分、经济效益和产投比均较其它轮作与连作模式明显提升,有助于谷子产量和谷田生产力的提升,可为谷子轮作制度的建立提供理论依据。由于轮作制度对作物连作障碍的缓解是多方面综合因素的影响,还需对土壤中微生物的响应等微生态环境变化进行长期的深入研究。

参 考 文 献

[1]贾冠清,刁现民.中国谷子种业创新现状与未来展望[J].中国农业科学,2022,55(4):653-665.
Jia G Q,Diao X M.Current status and perspectives of innovation studies related to foxtail millet seed industry in China [J]. Scientia Agricultura Sinica,2022,55(4):653-665.

[2]张一中,张一弓,柳青山.谷子在山西省旱作农业中的地位和作用[J].中国种业,2011,(8):21-22.
Zhang Y S,Zhang Y G,Liu Q S.Status and function of millet in dry farming in Shanxi Province[J].China Seed Industry,2011,(8):21-22.

[3]张尚沛,李凯,程炳文,等.宁夏不同生态区种植模式对谷子产量的影响[J].农业科学研究,2021,42(2):40-43.
Zhang S P,Li K,Cheng B W,et al.Effects of planting patterns on millet growth in different ecological areas in Ningxia [J]. Journal of Agricultural Sciences,2021,42(2):40-43.

[4]王根全,郝晓芬,郭二虎,等.连作与轮作谷子根际土壤真菌群落分布特征[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(5):677-689.
Wang G Q,Hao X F,Guo E H,et al.Distribution characteristics of the soil fungi community in the rhizosphere of foxtail millet under different planting patterns [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2023,31(5):677-689.

[5]季方芳,何其全,田婷,等.不同地区耕地轮作休耕模式与生态效应的研究进展[J].江西农业学报,2025,37(1): 99-108.
Ji F F,He Q Q,Tian T,et al. Research progress in fallow patterns and ecological effects of cultivated land rotation in different regions [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2025, 37 (1): 99-108.

[6]郑孟静,李岩,贾秀领.主要农作物多样化轮作制度研究进展及展望[J].华北农学报,2021,36(S1):215-221.
Zheng M J,Li Y,Jia X L.Research progress and perspective of diversified crop rotation systems in main crops [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2021,36(S1):215-221.

[7]赵峥,朱元宏,周德平,等.不同轮作模式对稻田土壤肥力和微生物群落结构的影响[J].农业环境科学学报,2024,43(4):874-885.

Zhao Z, Zhu Y H, Zhou D P, et al. Effects of different rotation patterns on soil fertility and microbial community composition in a paddy field system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(4): 874-885.

[8]Trabelsi D, Ben Ammar H, Mengoni A, et al. Appraisal of the crop-rotation effect of rhizobial inoculation on potato cropping systems in relation to soil bacterial communities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 54: 1-6.

[9]吴玉红,王吕,崔月贞,等.轮作模式及秸秆还田对水稻产量、稻米品质及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(11):1926-1937.
Wu Y H, Wang L, Cui Y Z, et al. Rice yield, quality, and soil fertility in response to straw incorporation and rotation pattern[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(11): 1926-1937.

[10]杨雪萍.连作对谷子生长及根际土壤环境的影响[D].太谷:山西农业大学,2022.
Yang X P. Effects of continuous cropping on millet growth and rhizosphere soil environment[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022.

[11]牛倩云,韩彦莎,徐丽霞,等.作物轮作对谷田土壤理化性质及谷子根际土壤细菌群落的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(12):2802-2809.
Niu Q Y, Han Y S, Xu L X, et al. Effects of crop rotation on soil physicochemical properties and bacterial community of foxtail millet rhizosphere soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(12): 2802-2809.

[12]王仪明,雷艳芳,魏臻武,等.不同轮作模式对青贮玉米产量、品质及土壤肥力的影响[J].核农学报,2017, 31(9):1803-1810.
Wang Y M, Lei Y F, Wei Z W, et al. Effects of different rotation modes on yield, quality of silage corn, and soil fertility[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(9): 1803-1810.

[13]李洋,石柯,朱长伟,等.不同轮作模式对黄淮平原潮土区土壤养分及作物产量的影响[J].水土保持学报, 2022, 36(2): 312-321.
Li Y, Shi K, Zhu C W, et al. Effect of different crop rotations on soil nutrients and crop yield in fluvo-aquic soil in Huang Huai Plain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 312-321.

[14]张成君,康文娟,张翠梅,等.基于主成分-聚类分析评价不同轮作模式对土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):292-300.
Zhang C J, Kang W J, Zhang C M, et al. Evaluation of the effects of different rotation patterns on soil fertility based on principal component-cluster analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 292-300.

[15]李丹,李小霞,李万星,等.谷子不同轮作模式对土壤理化性质及细菌群落的影响[J].江苏农业学报,2022,38(6):1500-1509.
Li D, Li X X, Li W X, et al. Effects of crops-millet rotations on soil physicochemical properties and bacterial community[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2022, 38(6): 1500-1509.

[16]鲍士旦.土壤农化分析3版[M].北京:中国农业出版社,2000:495.
Bao S D. Agrochemical analysis of soil 3rd[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 495.

[17]石晓旭,石吕,薛亚光,等.不同麦稻轮作模式产量、资源利用及经济效益分析[J].大麦与谷类科学,2024,41(1):57-67.
Shi X X, Shi L, Xue Y G, et al. Analysis of yield, resource use efficiency and economic benefit in different wheat-rice rotation systems[J]. Barley and Cereal Sciences, 2024, 41(1): 57-67.

[18]侯献飞,李强,苗昊翠,等.棉花-花生轮作模式对土壤养分及其产量的影响[J].新疆农业科学,2024,61(7): 1657-1665.
Hou X F, Li Q, Miao H C, et al. Effects of cotton-peanut rotation on the soil physicochemical properties and the yield of crop[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(7): 1657-1665.

[19]曹深岭,王瑞宝,吴剑,等.烟后轮作不同作物对植烟土壤的改善效果比较[J].江苏农业科学,2024,52(22):250-258.
Cao S L, Wang R B, Wu J, et al. Comparison of improvement effects of tobacco-growing soils by rotating different crops after tobacco[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(22): 250-258.

[20]孙倩,吴宏亮,陈阜,等.不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征[J].环境科学,2020,41(10):4682-4689.
Sun Q, Wu H L, Chen F, et al. Characteristics of soil nutrients and fungal community composition in crop rhizosphere under different rotation patterns[J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4682-4689.

[21]左琴,刘彦伶,李渝,等.长期不同轮作方式对黄壤区水稻产量和养分吸收及土壤养分含量的影响[J].土壤通报,2023,54(4):881-888.
Zuo Q, Liu Y L, Li Y, et al. Effects of long-term different cropping rotations on rice yield, nutrient uptake and soil nutrient contents in yellow soil region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 881-888.

[22]宋祥云,宋春燕,柳新伟,等.小麦玉米轮作条件下不同生物质炭对土壤腐殖物质的影响[J].土壤学报,2021,58(3):610-618.
Song X Y, Song C Y, Liu X W, et al. Effects of application of biochar on soil humic substances in cropland under wheat-corn rotation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 610-618.

[23]宋佳承,王天,闫士朋,等.不同种植模式对土壤质量及马铃薯生长的影响[J].土壤学报,2020,57(2):490-499.

Song J C, Wang T, Yan S P, et al. Influences of planting pattern on soil quality and potato growth[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 490-499.

[24]妙佳源,李夏,周达,等.连作对谷子土壤酶活性及养分的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(3):123-126,152.
Miao J Y, Li X, Zhou D, et al. Effects of foxtail millet continuous cropping on soil enzyme activities and nutrients[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 123-126, 152.

[25]郝晓芬,王根全,郭二虎,等.连作、轮作对谷子根际细菌群落结构的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(3):585-596.
Hao X F, Wang G Q, Guo E H, et al. Effects of continuous cropping and rotation on rhizosphere bacterial community structure of millet[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(3): 585-596.

[26]周旭东,韩天华,申云鑫,等.4种轮作模式下长期连作烟田土壤微生态的响应特征[J].中国农业科技导报,2024,26(3):174-187.
Zhou X D, Han T H, Shen Y X, et al. Response characteristics of soil microecology in long-term continuous cropping tobacco field under 4 rotation patterns [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(3): 174-187.

[27]Varvel G E. Monoculture and rotation system effects on precipitation use efficiency of corn [J]. Agronomy Journal, 1994, 86(1): 204-208.

[28]曹鑫鑫.轮作和有机肥配施对谷子连作障碍的缓解效应研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2024.
Cao X X. Study on the mitigation effect of rotation and organic fertilizer on continuous cropping obstacle of millet [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

[29]李小霞,李丹,李万星,等.不同轮作模式对谷子灌浆期生理特性、产量和品质的影响[J].浙江农业学报, 2023, 35(7): 1499-1510.
Li X X, Li D, Li W X, et al. Effects of different rotation patterns on physiological characteristics, yield and quality of foxtail millet during grain filling stage [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2023, 35(7): 1499-1510.

(编辑:郭玥微)