DOI:10.11686/cyxb2025512 http://cyxb.magtech.com.cn
赵旭恒, 王义翔, 侯国庆, 等. 新疆绿洲区杂交构树/鸭茅间作模式下光合特性、生产性能及土壤理化性质研究. 草业学报, 2026, 35(12): 41－53.
ZHAO Xu-heng, WANG Yi-xiang, HOU Guo-qing, *et al*. Photosynthetic characteristics, yield performance, and soil physical and chemical properties under a *Broussonetia papyrifera*/*Dactylis glomerata* intercropping system in the oasis area of Xinjiang. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(12): 41－53.

新疆绿洲区杂交构树/鸭茅间作模式下光合特性、生产性能及土壤理化性质研究

赵旭恒[1],王义翔[1],侯国庆[2],张辉[2],孙颖超[1],郑晓凯[1],何虹稣[1*],张凡凡[1*]
(1. 石河子大学动物科技学院,新疆 石河子 832000;2. 新疆生产建设兵团第七师农业科学研究所,新疆 奎屯 833200)

摘要:通过探究新疆绿洲区杂交构树与鸭茅间作系统的生产优势,为提升当地饲草产量与土壤利用率提供依据。本试验设置单作杂交构树(DG)、单作鸭茅(低/高播种量鸭茅:DYL/DYH)以及间作(杂交构树间作低/高播种量鸭茅:GYL/GYH)共5个处理,每个处理重复3次,系统测定其作物光合参数、产量、营养品质及土壤理化与酶活性指标。结果表明,1)构树和鸭茅在间作处理中的光合特性(净光合速率、胞间二氧化碳浓度、气孔导度、蒸腾速率)、鲜草、干草产量均显著高于对应的单作处理($P<0.05$);2)间作处理的粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、可溶性碳水化合物含量均显著低于单作处理($P<0.05$),而干物质含量无显著差异($P>0.05$);3)间作提高了0～20 cm土层全氮、全磷及有机碳含量,增强了脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性,GYL处理效果最优。综上,间作显著提升了两种作物的光合特性、干物质积累和土地利用效率,改善了局部土壤理化环境,其中GYL间作综合优势最显著,可作为新疆绿洲区优选牧草种植模式。

关键词:杂交构树;鸭茅;间作;光合特性;饲草品质;土壤理化性质

Photosynthetic characteristics, yield performance, and soil physical and chemical properties under a *Broussonetia papyrifera*/*Dactylis glomerata* intercropping system in the oasis area of Xinjiang

ZHAO Xu-heng[1], WANG Yi-xiang[1], HOU Guo-qing[2], ZHANG Hui[2], SUN Ying-chao[1], ZHENG Xiao-kai[1], HE Hong-su[1*], ZHANG Fan-fan[1*]
1. *College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi* 832000, *China*; 2. *Institute of Agriculture Science, Seventh Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Kuitun* 833200, *China*

Abstract: The aims of this work were to explore the production advantages of a *Broussonetia papyrifera*/*Dactylis glomerata* intercropping system in the oasis region of Xinjiang, and to provide a scientific basis for improving local forage yield and soil utilization efficiency. A field experiment was conducted with five treatments: Monoculture of *B. papyrifera* (DG), monoculture of *D. glomerata* at low and high seeding rates (DYL/DYH), and intercropping of *B. papyrifera* with *D. glomerata* at low and high seeding rates (GYL/GYH). Each treatment was replicated three times. Measurements were conducted to determine the photosynthetic parameters, yield, and nutritional quality of

收稿日期:2025-12-18;改回日期:2026-03-24
基金项目:南疆重点产业创新发展支撑计划项目(2022DB017),财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS)和自治区优质饲草产业技术体系项目(XJARS)资助。
作者简介:赵旭恒(1999－),男,河南洛阳人,在读硕士。E-mail: zhaoxuheng2025@163.com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: xiaosuhe0329@163.com, zhangfanfan@shzu.edu.cn

the crops, as well as soil physicochemical properties and enzyme activity. The results show that: 1) The photosynthetic characteristics (net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration, stomatal conductance, and transpiration rate), fresh forage yield, and hay yield of *B. papyrifera* and *D. glomerata* were significantly higher in the intercropping treatments than in the corresponding monoculture treatments ($P<0.05$); 2) The contents of crude protein, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, and water-soluble carbohydrates were significantly lower in the intercropping treatments than in the monocultures ($P<0.05$), but there was no significant difference in dry matter (DM) content ($P>0.05$); 3) Intercropping increased the contents of total nitrogen, total phosphorus, and organic carbon in the 0−20 cm soil horizon and enhanced the activities of soil enzymes (urease, catalase, and sucrase), with the largest values of these parameters in the GYL treatment. In conclusion, these results show that intercropping of *B. papyrifera* and *D. glomerata* significantly improves the photosynthetic characteristics, dry matter accumulation, and land-use efficiency of both crops, and improves the local soil physicochemical environment. Overall, the GYL intercropping configuration has the most advantages, so it is recommended as the best forage planting pattern for the oasis area of Xinjiang.

Key words: *Broussonetia papyrifera*; *Dactylis glomerata*; intercropping; photosynthetic characteristics; forage quality; soil physicochemical properties

畜牧业从传统生产模式向现代化转型是实现区域经济发展的关键战略[1]。新疆作为我国五大牧区之一,可耕地资源有限,当地牧草生产长期以单一种植为主,长期集约化种植又导致土壤养分失衡,进而引发牧草产量衰减与营养品质退化等问题,严重制约当地畜牧业的可持续发展[2]。间作是指在同一地块、同一生长周期内种植两种及以上作物的种植模式,通过物种间的生态互补与资源优化配置,可实现生产力提升、系统稳定性增强等多重目标。间作种植模式可以实现新疆绿洲区土地资源合理利用,为区域农业绿色可持续发展与生态环境保护提供有效技术路径[3]。

林草间作能有效缓解新疆绿洲区土地资源紧张,与常规草本间作相比,更具明显优势。草本间作的研究多数为同冠层、浅根系的作物搭配,种间竞争激烈、资源互补范围有限,连作条件下土壤培肥效应的持续性较弱,对光、水资源的利用也多停留在水平空间上的分配优化,难以从根本上摆脱单作种植的生态困境[4-6]。目前关于林草间作研究主要集中在不同植物对空间资源的分配利用[6],通过改变地上、地下相互作用进而影响作物生长。地上部分研究集中在光资源的分层利用,也是林草间作核心机制之一[7]。木本作物与矮秆作物搭配形成垂直空间光分配格局,木本作物可截获更多上层光能以提高自身光合效率,而矮秆作物则通过调整气孔导度、胞间二氧化碳浓度等生理特性适应弱光环境,实现群体光合效率的整体提升[8-9]。巨桉林(*Eucalyptus grandis*)与鸭茅(*Dactylis glomerata*)间作体系中(林分郁闭度<0.53时),间作鸭茅的日平均净光合速率也显著提高[10]。地下研究多围绕木本植物与牧草的根系互作,二者通过根系分泌物、凋落物分解,实现土壤有机质的积累与提升。木本植物根系结构改善土壤孔隙度与通气透水性,同时根系分泌的有机酸等物质优化根际微环境、促进土壤微生物增殖及酶活性提升,进而驱动土壤养分转化循环与理化性质整体优化[11-12]。例如,花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)与拉巴豆(*Dolichos lablab*)间作,显著提升土壤有机质、全氮、速效钾、碱解氮含量,降低土壤pH,增加土壤微生物数量[13]。林草间作研究多集中于经济林与牧草的套种,聚焦林下经济收益提升,而针对饲用型木本与牧草的林草间作研究较少,对其光合调控机制、产量品质协同形成规律的探索仍有待深入[14]。

杂交构树(*Broussonetia papyrifera*)作为速生木本饲料作物,具有适应性强、蛋白质含量高、生态效益突出等特点,在我国广泛分布[15-16]。鸭茅作为优质耐阴禾本科牧草,具有适口性佳、纤维品质优异等特点。两种牧草均为优良饲草资源,且株型差异明显,理论上可形成显著互补效应,在提升土地利用效率与产出水平方面具有较大潜力[17-21]。目前,新疆绿洲区饲草种植模式中,尚未见杂交构树与鸭茅间作体系的相关研究报道。鉴于此,本研究在新疆绿洲区构建杂交构树与鸭茅间作体系,系统探究不同间作模式下两种牧草的光合特征、生产性能及根际

土壤理化性质等。旨在明确杂交构树/鸭茅间作体系的优势;为优化新疆绿洲区土地高效利用模式、推动当地牧草产业可持续发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验田位于新疆生产建设兵团第七师农业科学研究所16号地(44°20′42″ N,83°51′40″ E),海拔450 m,温带大陆性气候,年平均气温7.6 ℃,极端最高气温41.8 ℃,>10 ℃年积温为3774.3 ℃,年平均降水量为150 mm,年平均太阳辐射4.15×10^9 J;土壤盐含量0.38%,前茬作物小麦(*Triticum aestivum*)。土壤基础理化性质见表1。

表1　供试土壤的基本理化性质

Table 1　Basic physical and chemical properties of the tested soil

土层 Soil layer (cm)	土壤pH Soil pH	全磷 Total phosphorus ($g\cdot kg^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($g\cdot kg^{-1}$)	全钾 Total potassium ($g\cdot kg^{-1}$)	有机碳 Organic carbon ($g\cdot kg^{-1}$)
0～20	8.07±0.01	1.28±0.10	3.08±0.07	16.60±1.54	30.29±3.45
20～40	8.07±0.01	1.37±0.06	3.16±0.11	16.19±1.32	33.33±2.87

1.2　试验设计

参考间作系统相关研究设置鸭茅播种量[19]。试验设置3个单作处理和2个间作处理,分别为:DG(单作杂交构树,种植密度为28571 株·hm^{-2})、DYL(低播种量单作鸭茅,播种量为22.5 kg·hm^{-2})、DYH(高播种量单作鸭茅,播种量为45.0 kg·hm^{-2})、GYL(杂交构树间作低播种量鸭茅,杂交构树密度28571 株·hm^{-2},鸭茅播种量为22.5 kg·hm^{-2})、GYH(杂交构树间作高播种量鸭茅,杂交构树密度28571 株·hm^{-2},鸭茅播种量为45.0 kg·hm^{-2})。采用随机区组设计,3次重复,共计15个小区,小区面积44 m^2(2 m×22 m),小区间设0.5 m保护行。间作小区采用4行杂交构树+6行鸭茅,条带种植模式如图1所示:杂交构树行距60 cm、株距30 cm,相邻2行构树间种植2行鸭茅,鸭茅行距30 cm。播种前翻耕、整平试验田,基肥为尿素105 kg·hm^{-2}、磷酸二氢钾60 kg·hm^{-2}。杂交构树采用带土坨移栽,种植坑深宽均为8～10 cm;鸭茅采用条播,播种深度1～2 cm。滴灌带间距60 cm,灌水量为全生长季4500 m^3·hm^{-2},每茬灌水约1500 m^3·hm^{-2}。建植当年刈割3次,刈割留茬高度5 cm;每次刈割后追施与基肥等量的尿素和磷酸二氢钾,以满足作物再生需求。

1.3　测定项目及方法

本研究于2024年5月10日进行构树幼苗移植和鸭茅播种,当年开展全部试验、取样与测定工作。当鸭茅处于初花期时对构树和鸭茅进行刈割。鸭茅和杂交构树的生育期见表2,刈割时间为6月25日刈割第1茬、8月17日刈割第2茬、10月8日刈割第3茬。

1.3.1　光合特性测定　　2024年10月8日,选择晴天上午11:00－14:00(生长季末期作物的种间竞争与互补效应经过全生长季的累积已充分显现,此时测定的光合参数,更能代表间作系统对作物光合生理的长期调控效应),利用便携式光合仪CI-340(CID Boi-Science-Inc,美国),选择杂交构树、鸭茅植株从上到下第3片复叶中间的健康完整及完全展开的小叶,光合有效辐射控制在1500 μmol·m^{-2}·s^{-1}左右,测定净光合速率(net photosynthetic rate,P_n)、气孔导度(stomatal conductance,C_s)、胞间二氧化碳浓度(intercellular CO_2 concentration,C_i)和蒸腾速率(transpiration rate,T_r)[22],每小区选择3片叶,每个叶片重复3次。

1.3.2　农艺性状测定方法　　在刈割前,随机选取各小区20株植株杂交构树与鸭茅,测定株高(plant height,PH)、鲜草产量(fresh yield,FY)、干草产量(hay yield,HY)。使用卷尺测量植株顶端到地面高度,各处理小区内选择1 m^2样方全株刈割(留茬5 cm),每个小区重复3次,称量全部鲜草后计算鲜草产量。将鲜草放置通风处自然阴干,全部称量后计算干草重量[23]。

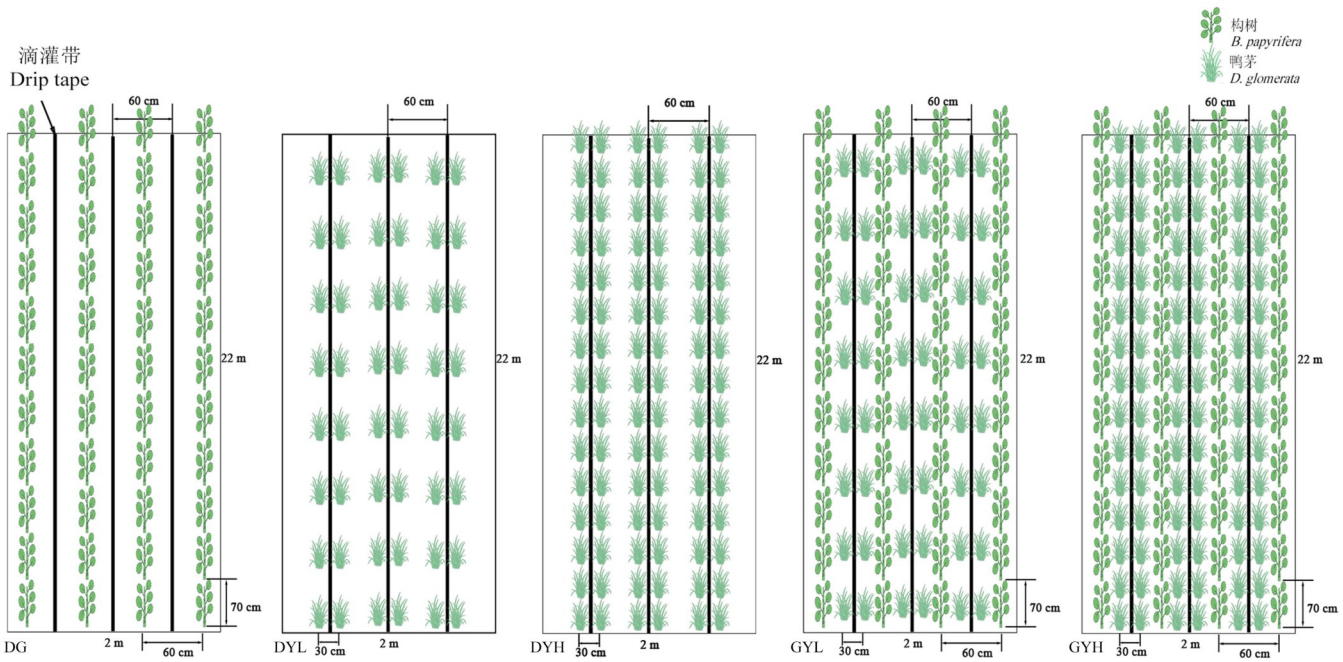

图1 杂交构树-鸭茅间作模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intercropping model of *B. papyrifera*-*D. glomerata*

DG: 单作杂交构树 Monoculture of *B. papyrifera*; DYL: 单作低播种量鸭茅 Monoculture of *D. glomerata* with low seeding rate; DYH: 单作高播种量鸭茅 Monoculture of *D. glomerata* with high seeding rate; GYL: 杂交构树间作低播种量鸭茅 Intercropping of *B. papyrifera* and *D. glomerata* with low seeding rate; GYH: 杂交构树间作高播种量鸭茅 Intercropping of *B. papyrifera* and *D. glomerata* with high seeding rate; 下同 The same below.

表2 试验当年(2024)杂交构树与鸭茅的物候期

Table 2 Phenological periods of *B. papyrifera* and *D. glomerata* in the experimental year (2024)

茬次 Cut	鸭茅 *D. glomerata*				杂交构树 *B. papyrifera*	
	出苗期 Seeding period	分蘖期 Tillering stage	抽穗期 Heading stage	初花期 Early flowering stage	幼苗期 Seedling stage	生长期 Growing period
1	05-10	05-22	06-18	06-25	05-10	06-25
2	—	07-05	07-25	08-17	—	08-17
3	—	08-15	09-13	10-07	—	10-07

土地当量比(land equivalent ratio, LER)是衡量间作系统生产效率的指标,表示达到相同产量时,间作所需土地面积与单作所需土地面积的比例。杂交构树和鸭茅间作LER的计算公式为:

$$LER=LER_1+LER_2=Y_{GY}/Y_{DG}+Y_{YG}/Y_{DY}$$

式中:LER_1为间作杂交构树的土地当量比;LER_2为间作鸭茅的土地当量比;Y_{GY}为间作处理中杂交构树的干草产量(kg·hm^{-2});Y_{DG}为单作杂交构树的干草产量(kg·hm^{-2});Y_{YG}为间作处理中鸭茅的干草产量(kg·hm^{-2});Y_{DY}为对应播种量单作鸭茅的干草产量(kg·hm^{-2})。当$LER>1$时,表明间作系统土地利用效率优于单作;$LER=1$时与单作相当;$LER<1$时劣于单作[24]。

1.3.3 营养品质测定方法 每茬刈割时采集鲜草样品,将样品置于105 ℃鼓风干燥机(DHG-9620A,上海合恒仪器设备有限公司)中杀青30 min,再于65 ℃烘干至恒重,粉碎后过1 mm筛,用于营养品质测定。干物质(dry matter, DM)含量:采用105 ℃烘干法测定,即样品烘干后重量与鲜重的百分比;粗蛋白质(crude protein, CP)含量:采用凯氏定氮法测定;粗脂肪(ether extract, EE)含量:采用玻璃索氏提取器(SE-250,上海魅宇设备有限公司),通过石油醚索氏浸提-残余法测定;可溶性碳水化合物(water soluble carbohydrates, WSC)含量:采用蒽酮比色法测定;中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量:使用范

氏洗涤纤维法测定[25]。

1.3.4　土壤理化性质及土壤酶活性测定　　于每茬刈割后，采用五点取样法采集各小区 0～20 cm 和 20～40 cm 土层土壤样品，每小区采集 5 个土样混合为 1 个待测样品，过 2 mm 筛后分为 2 份：一份新鲜土样用于土壤酶活性测定，一份自然风干后用于土壤理化性质测定。

采用 pH 计测定土壤 pH；采用水合热重铬酸钾氧化－比色法测定土壤有机碳（soil organic carbon，SOC）含量；采用凯氏定氮法测定全氮（total nitrogen，TN）含量；采用氢氧化钠熔融－钼锑抗比色法测定全磷（total phosphorus，TP）含量；采用氢氧化钠熔融－火焰光度计法测定全钾（total potassium，TK）含量；采用苯酚－次氯酸钠比色法测定脲酶（urease，UE）活性；采用磷酸苯二钠比色法测定碱性磷酸酶（alkaline phosphatase，AKP）活性；采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶（catalase，CAT）活性；采用 3，5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶（sucrase，SC）活性[26]。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 软件进行数据录入与初步整理；采用 IBM SPSS 26.0 软件进行统计分析，通过单因素方差分析（One-way ANOVA）检验处理间差异，采用 Duncan 氏多重比较法进行显著性检验；采用 Origin 2021 软件绘制图表。试验数据以“平均值±标准差（mean±SD）”表示，以 $P<0.05$ 为差异显著的判断标准。

2　结果与分析

2.1　间作模式对杂交构树、鸭茅光合特性的影响

对于杂交构树，间作处理（GYL、GYH）的净光合速率、胞间二氧化碳浓度、气孔导度、蒸腾速率均显著高于 DG 处理（$P<0.05$）；其中 GYL 处理的气孔导度、蒸腾速率显著高于 GYH（$P<0.05$，表 3）。对于鸭茅，间作处理的净光合速率、胞间二氧化碳浓度、气孔导度、蒸腾速率均显著高于 DYH、DYL 处理（$P<0.05$）；其中 GYL 处理的气孔导度、蒸腾速率显著高于 GYH（$P<0.05$），净光合速率显著低于 GYH（$P<0.05$）。

表 3　间作模式对杂交构树、鸭茅光合特性的影响

Table 3　Effect of intercropping patterns on photosynthetic characteristics of *B. papyrifera* and *D. glomerata* ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

作物 Plant	处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate	胞间二氧化碳浓度 Intercellular CO_2 concentration	气孔导度 Stomatal conductance	蒸腾速率 Transpiration rate
杂交构树 *B. papyrifera*	DG	27.73±0.34b	36.57±0.10c	81.56±0.72c	3.42±0.05c
	GYL	36.32±0.19a	41.50±0.47b	112.61±2.71a	4.38±0.02a
	GYH	36.39±0.39a	48.85±0.25a	89.10±0.60b	3.89±0.04b
鸭茅 *D. glomerata*	DYL	28.15±0.48c	29.16±0.20c	47.69±2.34d	2.65±0.65d
	DYH	27.44±0.51c	27.43±0.06c	53.38±4.66c	3.05±0.56c
	GYL	44.77±2.84b	54.02±3.07b	111.21±0.62a	3.92±0.31a
	GYH	47.82±2.11a	56.31±3.11a	109.00±0.45b	3.75±0.22b

注：同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

Note：Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

2.2　间作模式对杂交构树、鸭茅生产性能的影响

所有茬次间作处理（GYL、GYH）的鲜草产量、干草产量均显著高于单作处理（DG、DYL、DYH）（$P<0.05$），其中 GYL 处理的鲜草产量、干草产量显著高于 GYH（表 4）。对于杂交构树，第 2 茬 GYL 处理株高显著高于其余各处理（$P<0.05$），其他茬次 GYL 与 DG 处理的株高差异性不显著（$P>0.05$）。对于鸭茅，所有茬次单作处理株高均显著高于间作处理（$P<0.05$），其中 GYL 与 GYH 处理的株高差异性不显著（$P>0.05$）。各间作模式的 LER 均大于 1（表 5），说明各间作处理均具有间作优势。GYL 处理各茬 LER 均高于 GYH 处理，表明 GYL 处理的土壤利用率高于 GYH 处理，其中在第 3 茬 GYL 处理的 LER 最大，为 2.25。

表4 间作模式对作物农艺性状的影响

Table 4 Effect of intercropping patterns on agronomic traits of crops

茬次 Cut	处理 Treatment	鲜草产量 Fresh yield (t·hm^{-2})	干草产量 Hay yield (t·hm^{-2})	株高 Plant height (cm)	
				杂交构树 *B. papyrifera*	鸭茅 *D. glomerata*
1	DG	20.15±0.23Cd	5.55±0.53Bb	98.40±4.17Aa	—
	DYL	19.90±0.48Bd	5.06±0.16Bb	—	78.03±1.52Ba
	DYH	22.15±0.83Bc	6.12±0.97Ab	—	72.09±1.07Bb
	GYL	46.05±0.65Ca	13.34±2.14Aa	92.18±4.20Ba	54.48±1.15Cc
	GYH	41.15±1.62Bb	11.15±1.24Aa	76.82±1.50Bb	54.05±1.24Bc
2	DG	22.75±0.24Ad	6.63±0.15Ac	99.93±3.27Ab	—
	DYL	20.49±0.49ABd	6.00±0.19Ac	—	88.73±4.45Aa
	DYH	22.82±0.84ABc	7.24±1.18Ac	—	76.75±1.44Ab
	GYL	47.43±0.66Ba	15.53±2.48Aa	109.84±3.18Aa	65.70±1.66Ac
	GYH	42.45±1.66Ab	12.96±1.44Ab	96.24±1.05Ab	61.18±1.40Ac
3	DG	21.27±0.31Bd	5.98±0.52ABb	97.33±4.50Aa	—
	DYL	21.09±0.51Ad	5.82±0.18Ac	—	70.17±2.00Ca
	DYH	23.47±0.86Ac	7.04±1.11Ac	—	67.34±1.06Ca
	GYL	48.80±0.69Aa	15.19±1.14Aa	104.05±3.36Aa	58.56±1.75Bb
	GYH	43.43±2.02Ab	12.65±1.59Ab	99.14±4.69Aa	56.78±1.75Bb

同列不同小写字母表示相同茬次下不同处理间差异显著($P<0.05$);同列不同大写字母表示不同茬次下相同处理间差异显著($P<0.05$),下同。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments within the same cutting ($P<0.05$); different uppercase letters in the same column indicate significant differences among different cuttings for the same treatment ($P<0.05$), the same below.

2.3 间作模式对杂交构树、鸭茅营养品质的影响

所有茬次DG、GYL、GYH处理间DM均无显著差异($P>0.05$,表6)。所有茬次DG处理的粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、可溶性碳水化合物均显著高于GYL、GYH处理($P<0.05$)。第2、3茬GYL处理的粗蛋白显著高于GYH处理($P<0.05$);第3茬GYL处理的酸性洗涤纤维显著低于GYH处理;所有茬次GYL、GYH处理间的可溶性碳水化合物差异不显著($P>0.05$)。

所有茬次DYL、DYH、GYL、GYH处理的干物质均无显著差异(表7,$P>0.05$)。所有茬次单作处理的粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、可溶性碳水化合物均显著高于间作处理($P<0.05$)。所有茬次GYL处理的粗蛋白显著高于GYH处理($P<0.05$);所有茬次GYL、GYH处理间的中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维差异不显著($P>0.05$);第2茬GYL处理的可溶性碳水化合物显著高于GYH处理($P<0.05$),第1、3茬二者无显著差异。

表5 各间作模式土地当量比

Table 5 Land equivalent ratios of different intercropping patterns

茬次 Cut	处理 Treatment	LER_1	LER_2	LER
1	GYL	1.28	0.83	2.11
	GYH	0.96	0.81	1.77
2	GYL	1.04	0.65	1.70
	GYH	0.80	0.62	1.42
3	GYL	1.22	1.03	2.25
	GYH	1.03	0.84	1.87

LER_1: 间作杂交构树的土地当量比 The land equivalent ratio for intercropping with *B. papyrifera*; LER_2: 间作鸭茅的土地当量比 The land equivalent ratio for intercropping with *D. glomerata*; LER: 间作系统总土地当量比 The total land equivalent ratio of the intercropping system.

2.4 间作模式对土壤理化性质的影响

0～20 cm土层中。第1、2茬间作处理的全氮含量显著高于DG处理($P<0.05$),且GYL与GYH处理间无显著差异($P>0.05$,图2)。第1茬所有处理间全磷含量无显著差异($P>0.05$);第2、3茬GYL处理全磷含量显著高

表 6　间作模式对杂交构树营养品质的影响

Table 6　Effect of intercropping patterns on nutritional quality of *B. papyrifera* (%)

茬次 Cut	处理 Treatment	干物质 Dry matter	粗蛋白 Crude protein	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	可溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates	粗脂肪 Ether extract
1	DG	27.54±2.25Ba	21.52±0.19Aa	41.75±2.73Aa	19.89±0.98Aa	7.43±0.20Ca	8.90±1.06Aa
	GYL	28.02±1.20Ba	20.37±0.35Ab	30.07±1.21Ab	13.49±0.38Ab	6.26±0.17Cb	7.07±0.23Ab
	GYH	28.97±4.61Aa	19.41±0.42Ac	32.42±0.65Ab	13.63±0.46Ab	6.42±0.31Bb	7.84±0.24Aab
2	DG	28.12±2.29ABa	20.29±0.20Ba	39.37±2.62Aa	18.38±0.76Aa	8.34±0.23Ba	8.13±0.86Aa
	GYL	29.40±1.24ABa	18.52±0.19Bb	28.37±2.62Ab	12.68±0.76ABb	6.78±0.29Bb	7.53±0.82Aa
	GYH	28.11±4.95Aa	18.31±0.18Bb	30.09±1.28Bb	13.91±0.45Ab	7.29±0.35Ab	8.64±1.25Aa
3	DG	31.94±0.96Aa	18.55±0.21Ca	40.65±2.73Aa	19.59±1.03Aa	10.07±0.26Aa	6.91±1.52Aa
	GYL	32.51±2.27Aa	17.54±0.25Cb	28.17±1.72Ab	11.95±0.03Bc	7.36±0.26Ab	5.98±1.04Aa
	GYH	32.67±5.20Aa	16.82±0.14Cc	31.44±0.97ABb	13.79±0.67Ab	7.47±0.39Ab	7.68±0.73Aa

表 7　间作模式对鸭茅营养品质的影响

Table 7　Effects of intercropping patterns on nutritional quality of *D. glomerata* (%)

茬次 Cut	处理 Treatment	干物质 Dry matter	粗蛋白 Crude protein	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	可溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates	粗脂肪 Ether extract
1	DYL	25.44±0.94Ba	20.57±0.11Aa	59.21±0.54Aa	33.55±0.82Aa	8.87±0.45Aa	8.35±0.35Aa
	DYH	27.61±3.96Aa	17.29±0.03Ab	50.65±3.07Bb	30.48±0.94Ab	7.38±0.29Ab	8.14±0.12Aa
	GYL	25.71±2.51Aa	16.35±0.16Ac	38.90±2.45Ac	18.85±1.24Ac	7.31±0.21Abc	5.72±0.30Bb
	GYH	26.56±3.85Aa	15.12±0.13Bd	40.68±5.68Ac	19.39±2.34Ac	6.67±0.42Ac	4.04±0.43Bc
2	DYL	29.28±1.10ABa	18.22±0.08Ca	56.35±0.74Ba	31.57±0.77Ba	6.61±0.32Ca	6.99±0.59Bb
	DYH	27.97±2.65Aa	15.32±0.03Cb	53.07±0.63ABb	28.69±0.88Ab	5.59±0.37Cb	8.74±0.50Aa
	GYL	28.87±3.56Aa	14.94±0.15Bc	36.91±2.54Ac	17.03±2.52Ac	4.82±0.24Cc	6.94±0.79Ab
	GYH	26.62±2.70Aa	13.85±0.19Cd	39.85±1.68Ac	19.10±1.11Ac	4.14±0.16Cd	5.92±0.57Ab
3	DYL	31.68±4.75Aa	19.59±0.09Ba	58.10±0.78Aa	32.93±0.80ABa	7.82±0.40Ba	9.11±0.55Aa
	DYH	29.27±1.08Aa	16.47±0.03Bb	54.73±0.65Aa	29.90±0.92Aa	6.50±0.25Bb	7.85±0.58Ab
	GYL	29.95±4.34Aa	16.12±0.14Ac	38.29±2.62Ab	17.71±2.18Ab	6.43±0.19Bbc	6.57±0.53ABc
	GYH	27.03±2.84Aa	15.69±0.11Ad	40.01±2.78Ab	19.03±2.29Ab	5.87±0.36Bc	5.69±0.09Ac

于其他处理($P<0.05$)。所有茬次间作处理的全钾含量与单作处理无显著差异($P>0.05$)。第2、3茬GYL处理的有机碳含量显著高于其他各处理($P<0.05$)。

20～40 cm土层中,所有茬次间作处理全氮含量均显著低于DG处理($P<0.05$),其中第1、3茬GYL处理显著高于GYH处理($P<0.05$)。第1茬所有处理全磷含量无显著差异($P>0.05$);第2茬GYL、GYH处理全磷含量显著高于其余处理($P<0.05$)。第1、2茬各处理间全钾含量均无显著差异($P>0.05$)。第2、3茬GYL处理有机碳含量最高,且显著高于DG、DYL和DYH处理($P<0.05$)。

2.5　间作对土壤酶活性的影响

0～20 cm土层中,所有茬次间作处理的土壤pH均显著高于其他处理($P<0.05$,表8)。脲酶活性仅在第3茬存在显著差异,GYL处理显著高于DG处理。第1、2茬间作处理的碱性磷酸酶活性显著低于单作处理($P<0.05$);所有茬次GYL与GYH处理间碱性磷酸酶活性无显著差异($P>0.05$)。所有茬次GYL处理的过氧化氢酶活性均为最高,其中第2、3茬GYL处理显著高于其他处理($P<0.05$)。所有茬次GYL处理的蔗糖酶活性均最高,第1、3茬显著高于其他处理($P<0.05$)。

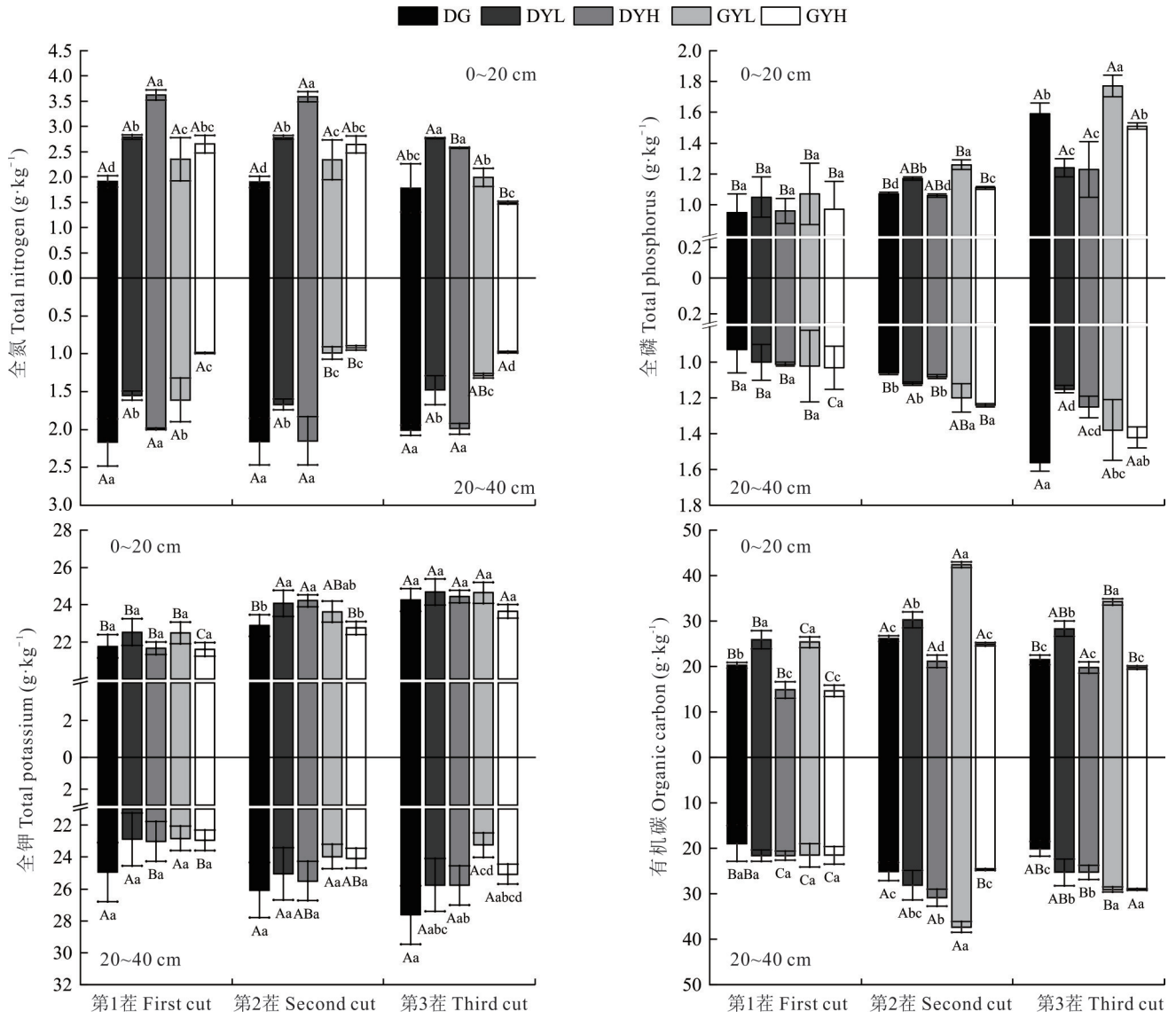

图2 间作模式对杂交构树、鸭茅0～40 cm土壤的影响

Fig. 2 Effects of intercropping patterns on soil (0–40 cm) of *B. papyrifera* and *D. glomerata*

不同小写字母表示相同茬次下不同处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示不同茬次下相同处理间差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments within the same cropping cut ($P<0.05$), different uppercase letters indicate significant differences among different cropping cut in the same treatments ($P<0.05$).

20～40 cm土层,所有茬次DG处理土壤pH显著低于间作处理(表9,$P<0.05$)。所有茬次GYL处理的脲酶活性显著高于单作处理($P<0.05$),其中第2、3茬GYL处理显著高于GYH处理($P<0.05$)。所有茬次间作处理碱性磷酸酶活性显著低于DG处理($P<0.05$),其中第2茬GYL显著高于GYH处理($P<0.05$)。所有茬次间作处理的过氧化氢酶活性均显著高于单作处理($P<0.05$),其中第3茬GYL处理显著高于GYH处理($P<0.05$)。所有茬次间作处理蔗糖酶活性显著高于DG处理($P<0.05$),其中第1茬GYL处理显著高于GYH处理($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 间作模式对作物光合特性及农艺性状的影响

光合特性是植物适应环境变化、实现物质积累的核心生理基础,其强弱直接反映作物对资源的利用效率[27]。Gong等[28]在黍子(*Panicum miliaceum*)/花生(*Arachis hypogaea*)的间作研究中表明,间作相较单作显著提高了黍

表 8　间作模式对 0～20 cm 土壤酶活性的影响

Table 8　Effect of intercropping patterns on soil enzyme activities in the 0–20 cm layer

茬次 Cut	处理 Treatment	pH	脲酶 Urease ($mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase ($mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$)	过氧化氢酶 Catalase ($mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$)	蔗糖酶 Sucrase ($mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$)
1	DG	7.98±0.09Ab	3.89±0.03Ba	0.54±0.02Ba	1.14±0.05Ca	10.19±0.28Bd
	DYL	7.98±0.06Ab	3.81±0.13Ca	0.46±0.01Bb	0.98±0.05Cc	10.21±0.42Cd
	DYH	7.99±0.03Ab	3.78±0.06Ca	0.53±0.02Ba	1.05±0.03Cbc	12.95±2.24Bc
	GYL	8.25±0.12Aa	3.98±0.25Ca	0.35±0.02Cc	1.18±0.06Ca	18.97±1.31Ba
	GYH	8.21±0.06Aa	3.89±0.06Ba	0.33±0.01Cc	1.13±0.04Cab	16.53±0.54Bb
2	DG	8.00±0.03Ac	5.29±0.04Aa	0.57±0.02Ab	1.28±0.05Ab	15.16±1.81Ab
	DYL	7.98±0.01Acd	5.41±0.18Aa	0.52±0.01Ac	1.33±0.06Ab	22.80±0.93Aa
	DYH	7.98±0.01Acd	5.41±0.09Aa	0.62±0.02Aa	1.26±0.04Ab	20.63±3.56Aa
	GYL	8.26±0.01Aa	5.81±0.36Aa	0.40±0.05Bd	1.48±0.07Aa	22.10±0.73Aa
	GYH	8.22±0.01Ab	5.28±0.08Aa	0.41±0.01Bd	1.32±0.04Ab	21.02±1.44Aa
3	DG	8.04±0.08Ab	3.67±0.02Cc	0.47±0.02Ca	1.26±0.01Bbc	13.28±0.91Ac
	DYL	8.01±0.05Ab	4.03±0.14Ba	0.38±0.01Cc	1.21±0.02Bc	12.66±0.52Bc
	DYH	7.99±0.02Ab	4.01±0.05Ba	0.46±0.02Cab	1.14±0.01Bd	15.29±0.64Bb
	GYL	8.37±0.05Aa	4.05±0.25Ba	0.41±0.06Abc	1.39±0.04Ba	16.98±0.13Ca
	GYH	8.30±0.05Aa	3.85±0.06Cb	0.43±0.01Aabc	1.29±0.04Bb	14.70±0.54Bb

表 9　间作模式对 20～40 cm 土壤酶活性的影响

Table 9　Effect of intercropping patterns on soil enzyme activities in the 20–40 cm layer

茬次 Cut	处理 Treatment	pH	脲酶 Urease ($mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$)	碱性磷酸酶 Alkaline Phosphatase ($mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$)	过氧化氢酶 Catalase ($mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$)	蔗糖酶 Sucrase ($mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$)
1	DG	8.05±0.08Ab	3.42±0.04Bc	0.51±0.01Ba	0.97±0.02Cb	7.13±0.14Ad
	DYL	8.23±0.03Aa	3.57±0.03Cb	0.49±0.02Aab	0.88±0.01Cc	7.67±1.17Bcd
	DYH	8.20±0.04Aa	3.45±0.11Cbc	0.46±0.02Bb	0.91±0.02Cc	8.82±0.29Cbc
	GYL	8.21±0.07Aa	3.94±0.09Ca	0.31±0.01Bc	1.07±0.03Ca	14.18±1.42Ba
	GYH	8.20±0.04Ba	3.86±0.03Ba	0.31±0.02Cc	1.09±0.03Ca	10.32±0.62Bb
2	DG	8.05±0.08Ab	4.80±0.30Ab	0.53±0.01Aa	1.09±0.02Ac	8.91±0.17Ac
	DYL	7.98±0.01Bc	4.71±0.04Ab	0.50±0.02Aa	0.99±0.01Be	15.62±2.37Aab
	DYH	7.98±0.01Bc	4.75±0.14Ab	0.50±0.02Aa	1.05±0.02Ad	13.06±0.43Ab
	GYL	8.22±0.02Aa	5.12±0.12Aa	0.37±0.04Ab	1.15±0.01Bb	17.31±1.73Aa
	GYH	8.21±0.01Ba	4.67±0.04Ab	0.34±0.01Bc	1.21±0.01Aa	14.80±0.89Aab
3	DG	8.07±0.07Ab	3.22±0.04Cc	0.45±0.01Ca	1.05±0.01Bc	8.76±1.94Ab
	DYL	8.01±0.02Bbc	3.78±0.04Bb	0.38±0.02Bb	1.01±0.01Ad	8.97±1.37Bab
	DYH	8.02±0.03Bbc	3.68±0.12Bb	0.39±0.01Cb	1.02±0.01Bcd	9.97±0.32Bab
	GYL	8.28±0.06Aa	4.02±0.09Ba	0.38±0.03Ab	1.27±0.01Aa	11.18±0.90Ca
	GYH	8.30±0.03Aa	3.78±0.03Cb	0.37±0.01Ab	1.18±0.01Bb	9.19±0.75Bab

子的株高、叶面积指数和地上部生物量积累，并且显著提高了黍子的光能利用效率、水分利用效率和氮肥偏生产力。在本研究中，杂交构树/鸭茅间作显著提升了两种作物的净光合速率、胞间二氧化碳浓度、气孔导度和蒸腾速率，其中间作处理下杂交构树的净光合速率较单作 DG 提升 30.98%～31.23%，鸭茅的净光合速率较单作（DYL/DYH）提升 59.04%～74.27%，这可能是杂交构树作为高位植物，在与低位植物鸭茅的光资源竞争中占据优势，

可捕获更多上层光照;而鸭茅因处于光能竞争的天然劣势地位,需通过扩大气孔开度以最大化二氧化碳捕获效率,进而补偿光合强度的不足,最终实现净光合速率的提升[5]。

作物产量是群体资源利用效率的综合体现,间作系统的核心优势在于通过时空互补提升土地生产力。付浩川等[29]在玉米(*Zea mays*)/大豆(*Glycine max*)间作研究中发现,间作可通过时空互补优化光、热、水、养分等资源的分配效率,进而显著提升土地生产力,其土地当量比(LER)大于1,土地利用率显著提高。本研究中GYL处理的LER达2.25,GYH处理为1.87,所有间作处理的LER都大于1,牧草总产量也显著高于单作。间作鸭茅株高显著低于单作鸭茅。这可能源于种间竞争下的表型可塑性调控,鸭茅通过降低株高减少与构树的光照竞争,转而优化光合效率和资源分配,保障生物量积累[30]。

3.2 间作模式对作物营养品质的影响

牧草营养品质直接决定其饲喂价值,其中粗蛋白含量是评价营养价值的核心指标,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维则影响牧草的适口性与瘤胃消化率[31]。Muglia等[32]对高粱(*Sorghum bicolor*)与热带禾草的研究表明,间作系统较单作显著提升高粱的干物质含量,降低酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量。本研究结果发现,单作杂交构树、单作鸭茅的粗蛋白含量显著高于间作杂交构树与鸭茅,且GYL处理粗蛋白含量显著高于GYH处理。同时,间作处理显著降低了构树和鸭茅的中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量。粗蛋白含量降低可能是种间氮素竞争与分配机制,杂交构树和鸭茅均对土壤氮素存在需求,间作系统中二者的根际微生态互作加剧了氮素竞争,有限的氮素被两种作物共享分配,导致各自的粗蛋白合成与积累受到一定限制。中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量显著降低,可能与根际分泌物的互作效应密切相关。桑科的杂交构树与禾本科的鸭茅根系分泌物成分存在差异,二者互作时可能产生协同效应,抑制牧草细胞壁木质化相关酶的活性,减少木质素和纤维素的合成与沉积,进而降低中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量[33-34]。综上,从饲喂价值来看,间作处理虽然粗蛋白对比单作略有降低,但纤维品质的优化能显著提升牧草适口性和瘤胃降解率,提高反刍动物消化率。其中GYL处理对比GYH处理综合饲喂效果更优,符合新疆绿洲区畜牧业对优质饲草的需求。

3.3 间作模式对土壤理化和酶活性的影响

土壤理化性质是衡量土壤肥力的重要指标,其状况直接影响作物的养分供应能力[35]。Feng等[36]研究发现,桑树(*Morus alba*)/大豆间作增加了土壤有效磷、有效钾和含水量,降低土壤有效氮和pH。在本研究中,间作处理提高了土壤有机碳含量和全磷含量,尤其在GYL处理中表现最为突出,这可能因为间作模式利用作物间的互补性,提高了作物的光能和养分利用效率,从而增加了作物的生物量和根系分泌物,这些物质在土壤中分解后有助于增加有机碳含量、全磷含量的积累[37]。本研究中,间作处理的0~20 cm土壤全氮含量显著高于单作构树,显著低于单作鸭茅;而在20~40 cm土壤,全氮含量高于单作鸭茅。推测构树与鸭茅的种间竞争关系导致了其对土壤氮素吸收的生态位分化。构树主要从0~20 cm表层土壤中获取氮素,而鸭茅作为禾本科植物,其根系对20~40 cm深层的氮素具有更强的吸收能力。这种互补的汲取模式,有效地减少了对有限资源的直接竞争,从而印证了种间相互作用对土壤养分循环与空间结构的塑造功能[34]。

土壤pH是影响土壤养分有效性与微生物活性的基础因子,而土壤酶参与土壤氮素转化、磷素活化、氧化还原平衡及碳循环过程,其活性变化可直观反映间作系统对土壤肥力的调控效应[38]。本研究中,间作处理的pH显著高于单作,其原因可能是构树与鸭茅的根系分泌物可中和土壤酸性离子进而提高表层土壤pH[12];GYL处理的脲酶活性相比于单作构树提高。可能因为间作作物的根系分泌物能够中和土壤酸性离子,提高土壤pH,从而为微生物活性提供了更适宜的条件[38];间作处理的碱性磷酸酶活性低于单作处理,其原因可能是间作系统中,禾本科根系分泌的有机酸可活化土壤难溶性磷提升有效磷水平;微生物感知到磷素充足后,下调碱性磷酸酶的合成,最终表现为间作处理酶活性低于单作[39];GYL处理的过氧化氢酶显著高于单作处理,可能因为单作系统根系分泌物单一、微生物群落结构简单,H_2O_2分解能力有限;间作通过空间互补,增加微生物生境多样性,促进假单胞菌、芽孢杆菌等具有过氧化氢分解能力的微生物繁殖,且低播量下竞争适度,微生物活性最高[40]。本研究中,间作处理蔗糖酶活性显著高于单作处理,推测因间作系统中构树与鸭茅的根系分泌物更丰富,提高土壤微生物的活跃

度，进而促进蔗糖酶的活性表达[41]。

4　结论

本研究证实，间作显著提升了两种作物的净光合速率、胞间二氧化碳浓度、气孔导度及蒸腾速率，并且显著提高了作物的产量。此外，间作有效改善了局部土壤环境，促进了土壤有机碳与全磷的积累，并显著提高了脲酶、过氧化氢酶及蔗糖酶的活性。间作系统整体降低了粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量。综合分析表明，GYL 处理（杂交构树低播量间作鸭茅，杂交构树密度 28571 株·hm^{-2}，鸭茅种植密度为 22.5 kg·hm^{-2}）表现出最佳的综合效益，可作为新疆绿洲区的高产牧草栽培推广模式。

参考文献 References：

[1] Yuan M L, Wang Y X, Zhang B, *et al*. Grassland ecological conservation and high-quality development of prataculture in Xinjiang. Pratacultural Science, 2023, 40(5): 1135－1139.
袁明龙，王玉祥，张博，等. 新疆草原生态保护与草业高质量发展. 草业科学，2023，40(5)：1135－1139.

[2] Chen W, Wang C, Pan C N, *et al*. Study on wild forage plant resources in the southern agricultural area of the Junggar Basin. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(6): 1－7.
陈威，王超，潘成南，等. 准噶尔盆地南部农区野生饲用植物资源研究. 干旱地区农业研究，2023，41(6)：1－7.

[3] Mei P P, Gui L G, Wang P, *et al*. Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil. Field Crops Research, 2012, 130: 19－27.

[4] Xiang R, Yi W B, Zhao W, *et al*. Effects of intercropping on soil aggregate-associated organic carbon storage and nitrogen regulation. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 303－308.
向蕊，伊文博，赵薇，等. 间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应. 水土保持学报，2019，33(5)：303－308.

[5] Zhao Q Y, Wang X G, Shan X H, *et al*. Screening of mixed sowing combinations and interspecific relationship between oat and annual leguminous forages in Horqin Region. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(10): 54－63.
赵晴云，王显国，单新河，等. 科尔沁地区燕麦与豆科饲草混播组合筛选和种间关系研究. 中国草地学报，2025，47(10)：54－63.

[6] Bao W Y, Wei J Y, Guo R, *et al*. Optimizing root interactions to regulate interspecific relationships and productivity in legume－grass mixtures during the establishment phase. Pratacultural Science, 2025, 42(9): 2322－2331.
包乌云，魏嘉遥，郭蓉，等. 优化根系互作调控豆－禾混播系统建植期种间关系与生产力. 草业科学，2025，42(9)：2322－2331.

[7] Lin F, Liu X J, Tong C C, *et al*. Effects of intercropping on light energy utilization characteristics and productivity of different feed crops. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3452－3462.
蔺芳，刘晓静，童长春，等. 间作对不同类型饲料作物光能利用特征及生产能力的影响. 应用生态学报，2019，30(10)：3452－3462.

[8] Lü Q Q, He N, Zhang Y J, *et al*. Eco-physiological mechanism of crop yield formation regulated by intercropping and rotation through root-shoot interaction. Plant Physiology Journal, 2023, 59(7): 1277－1290.
吕晴晴，何宁，张永江，等. 间作和轮作通过根冠互作调控作物产量形成的生理生态机制. 植物生理学报，2023，59(7)：1277－1290.

[9] Eskandari H, Ghanbari-Bonjar A, Galavi M, *et al*. Forage quality of cow pea (*Vigna sinensis*) intercropped with corn (*Zea mays*) as affected by nutrient uptake and light interception. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2009, 37(1): 171－174.

[10] Liu C. The study on herbages yield effect and ecophysiological mechanism in Eucalyptus grandis＋herbage inter-cropping system. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2008: 14－15.
刘闯. 巨桉林＋草间作模式中牧草产量效应及其生理生态学特征研究. 雅安：四川农业大学，2008：14－15.

[11] Bai C J, Yu D G, Chen Z Q, *et al*. Study on soil microorganism and its activity of the soil of silvopastoral systems. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(5): 841－846.
白昌军，虞道耿，陈志权，等. 林草间作系统土壤微生物及其活性研究. 热带作物学报，2015，36(5)：841－846.

[12] Liu J H, Niu Y N, Luo Z Z, *et al*. Soil water utilization characteristics of slope land in hedgerow and grain crop intercropping systems on the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(6): 111－119.

刘家鹤, 牛伊宁, 罗珠珠, 等. 黄土高原坡耕地植物篱—作物间作系统水分利用特征研究. 草业学报, 2018, 27(6): 111－119.

[13] Huang P, Zhang L Y, Ji S G, *et al*. Effects of forest-grass intercropping on soil nutrient and microbial populations in Karst rocky desertification areas. Pratacultural Science, 2024, 41(7): 1549－1557.
黄沛, 张雷一, 纪署光, 等. 喀斯特石漠化区林草间作对土壤养分及微生物数量的影响. 草业科学, 2024, 41(7): 1549－1557.

[14] Li L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: Current knowledge and perspectives. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 403－415.
李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403－415.

[15] Deng Q Y, Fu D Q, Huang R Z, *et al*. Effects of pine needle essential oil on the quality and aerobic stability of *Broussonetia papyrifera* silage. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(10): 85－94.
邓清源, 付东青, 黄嵘峥, 等. 松针精油对构树青贮品质及有氧稳定性的影响. 草业学报, 2025, 34(10): 85－94.

[16] Wu C R, Dai S, Liang L F, *et al*. Effects of different additives on fermentation quality and protein degradation of *Broussonetia papyrifera* silage. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(10): 169－179.
吴长荣, 代胜, 梁龙飞, 等. 不同添加剂对构树青贮饲料发酵品质和蛋白质降解的影响. 草业学报, 2021, 30(10): 169－179.

[17] Xie K Y, Cao K, Wan J C, *et al*. Change in productivity of swards of different forage legume and grass species monocultures and combinations in the semi-arid region of Xinjiang Province. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(4): 29－40.
谢开云, 曹凯, 万江春, 等. 新疆半干旱区不同豆科/禾本科牧草混播草地生产力的变化研究. 草业学报, 2020, 29(4): 29－40.

[18] Zhang X, Nie G, Huang L K, *et al*. Effect of plant growth regulator on seed yield of *Dactylis glomerata*. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(6): 93－100.
张旭, 聂刚, 黄琳凯, 等. 植物生长调节剂对鸭茅种子产量的影响. 草业学报, 2019, 28(6): 93－100.

[19] Xie K Y, Meng X, Xu Z Z, *et al*. Study on forage yield and nutritional value of mixed-culture grassland of different legume and grass forage in semi-arid area of Xinjiang. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(8): 1835－1842.
谢开云, 孟翔, 徐珍珍, 等. 新疆半干旱地区不同种类混播草地的牧草产量和营养价值研究. 草地学报, 2021, 29(8): 1835－1842.

[20] Wu T, Song F C, Cao W X, *et al*. Effects of different interplanting row ratio on silage quality of alfalfa/corn mixed silage. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6): 1961－1971.
武涛, 宋福超, 曹文侠, 等. 不同套种行数比对紫花苜蓿/玉米混合青贮品质的影响. 草地学报, 2025, 33(6): 1961－1971.

[21] Guo B, Luo W C, Shan L S, *et al*. Effects of simulated warming on photosynthesis of typical desert shrubs in the Hexi Corridor. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 145－157.
郭彬, 罗维成, 单立山, 等. 模拟增温对河西走廊典型荒漠灌木光合作用的影响. 草业学报, 2025, 34(7): 145－157.

[22] Wang P L, Yan Z Z, Gao L J, *et al*. Analysis of genetic variation in agronomic traits of half-sib families of *Melilotus albus* in the second generation of recurrent selection. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(1): 238－245.
王朋磊, 剡转转, 高莉娟, 等. 白花草木樨第二次轮回选择半同胞家系农艺性状的遗传变异分析. 草业学报, 2022, 31(1): 238－245.

[23] Kang Y X, Jiang Y B, Qi G P, *et al*. Effects of *Onobrychis viciifolia* and *Bromus inermis* grass mixture sowing and deficit irrigation on grassland water use and production performance. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(8): 115－128.
康燕霞, 姜渊博, 齐广平, 等. 红豆草与无芒雀麦混播草地生产力提升的水分调控模式研究. 草业学报, 2023, 32(8): 115－128.

[24] Yang S. Feed analysis and feed quality inspection technology. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993: 59－79.
杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 59－79.

[25] Ou X, Lian H, Chen R Q, *et al*. Effects of different fertilization treatments on soil physical and chemical properties and enzyme activity of rare earth mine tailings after planting king grass. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 94－108.
欧翔, 连海, 陈荣强, 等. 不同施肥处理种植王草后对稀土尾矿土壤理化性质和酶活性的影响. 草业学报, 2025, 34(2): 94－108.

[26] Hou W L, Kang W J, Lu B F, *et al*. Effects of rhizobial strains with different symbiotic effects on the photosynthetic characteristics and respiratory metabolism of alfalfa. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(11): 66－80.

侯文璐，康文娟，陆保福，等．不同共生效应根瘤菌株对紫花苜蓿光合特性和呼吸代谢的影响．草业学报，2025，34(11)：66－80.

[27] Cao M J，Wang J Y，Cui Y，*et al*. Effects of different maize and soybean intercropping ratios on photosynthetic characteristics and yield of soybean. Soybean Science，2023，42(1)：48－54.
曹曼君，王婧瑜，崔悦，等．不同玉米大豆间作行比对大豆光合特性及产量的影响．大豆科学，2023，42(1)：48－54.

[28] Gong X，Dang K，Liu L，*et al*. Intercropping combined with nitrogen input promotes proso millet (*Panicum miliaceum*) growth and resource use efficiency to increase grain yield on the Loess Plateau of China. Agricultural Water Management，2021，243：106434.

[29] Fu H C，Li C，Li H N，*et al*. Effects of different cereal-legume intercropping systems on crop yield，water usage，and nitrogen utilization. Agricultural Research in the Arid Areas，2025，43(3)：200－209.
付浩川，李成，李贺男，等．不同禾豆间作模式对作物产量及水氮利用的影响．干旱地区农业研究，2025，43(3)：200－209.

[30] Guan H，Xu D，Li H P，*et al*. A study of nutritional quality and rumen degradation characteristics of 17 oat varieties in high cold regions. Acta Prataculturae Sinica，2024，33(9)：185－198.
关皓，许多，李海萍，等．高寒地区17个燕麦品种营养品质及瘤胃降解特性研究．草业学报，2024，33(9)：185－198.

[31] Li J，Li W Z，Ji B. Effect of mixed-planting mode on silage maize yield and forage quality. Crops，2010，3：100－103.

[32] Muglia G R P，Orrico Junior M A P，Retore M，*et al*. Productivity and fermentative and nutritional quality of silages from biomass sorghum intercropped with tropical grasses. AgriEngineering，2025，7(10)：345.

[33] Shi H C，Wang S Y，Liu M Y，*et al*. Identification of mulberry root exudates and effects of main active compounds on the growth of *Ralstonia pseudosolanacearum*. Plant Physiology Journal，2024，60(9)：1475－1485.
史惠聪，王思怡，刘梦圆，等．桑树根系分泌物鉴定及其主要活性物质对桑树青枯菌生长的影响研究．植物生理学报，2024，60(9)：1475－1485.

[34] Li M E，Lai Z T，Tian J H. Research progress and prospect on the regulation of intercropping on soil aggregate structure and function. Chinese Journal of Applied Ecology，2025，36(11)：3512－3522.
李铭恩，赖泽婷，田纪辉．间作调控土壤团聚体结构及功能的研究进展与展望．应用生态学报，2025，36(11)：3512－3522.

[35] Xiao Y，Li L，Zhang F. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ^{15}N techniques. Plant and Soil，2004，262(1)：45－54.

[36] Feng X，Zhong M，Zhao X，*et al*. Intercropping forage mulberry benefits nodulation and growth of soybeans. Agriculture，2025，15(8)：902－920.

[37] Hu J W，Zhu W X，Zhang H H，*et al*. Effects of mulberry/soybean intercropping on the plant growth and rhizosphere soil microbial number and enzyme activities. Chinese Journal of Applied Ecology，2013，24(5)：1423－1427.
胡举伟，朱文旭，张会慧，等．桑树/大豆间作对植物生长及根际土壤微生物数量和酶活性的影响．应用生态学报，2013，24(5)：1423－1427.

[38] Tang X，Zhang Y，Jiang J，*et al*. Sugarcane/peanut intercropping system improves physicochemical properties by changing N and P cycling and organic matter turnover in root zone soil. PeerJ，2021，9：e10880.

[39] Tang X M，Huang Z P，Wu H N，*et al*. Correlation and principal component analysis of the soil environmental factors in corn/peanut intercropping system. Ecology and Environmental Sciences，2020，29(2)：223－230.
唐秀梅，黄志鹏，吴海宁，等．玉米/花生间作条件下土壤环境因子的相关性和主成分分析．生态环境学报，2020，29(2)：223－230.

[40] Chen X，Jiang N，Condron L M，*et al*. Impact of long-term phosphorus fertilizer inputs on bacterial *phoD* gene community in a maize field，Northeast China. Science of the Total Environment，2019，669：1011－1018.

[41] Luo Y，Wang L G，Chen J，*et al*. Effects of different flex cropping modes on soil enzyme activities and soil nutrients in the cold area of middle part of Gansu. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2017，31(6)：1185－1191.
罗影，王立光，陈军，等．不同种植模式对甘肃中部高寒区胡麻田土壤酶活性及土壤养分的影响．核农学报，2017，31(6)：1185－1191.