

DOI:10.11686/cyxb2025131

http://cyxb.magtech.com.cn

臧家艺, 徐明杰, 谢济骋, 等. 有机肥等氮替代化肥对旱作区青贮玉米/饲用大豆间作系统饲草产量和水分利用效率的影响. 草业学报, 2026, 35(3): 83—95.

ZANG Jia-yi, XU Ming-jie, XIE Ji-cheng, *et al.* Effects of replacing chemical fertilizers with organic fertilizer at equivalent nitrogen levels on forage yield and water use efficiency in a silage maize/forage soybean intercropping system in dryland areas. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(3): 83—95.

有机肥等氮替代化肥对旱作区青贮玉米/饲用大豆间作系统饲草产量和水分利用效率的影响

臧家艺^{1,2,3}, 徐明杰^{1,2,3}, 谢济骋^{1,2,3}, 沈禹颖^{1,2,3}, 来兴发^{1,2,3*}

(1. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州大学草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 3. 甘肃庆阳草地农业生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 庆阳 745004)

摘要:为探究有机肥等氮替代化肥和间作比例对黄土高原地区青贮玉米/饲用大豆间作系统饲草产量和水分利用效率的影响,于2024年在陇东黄土高原的台塬区西峰和丘陵沟壑区环县开展试验,设置100%无机氮肥模式下2行玉米/2行大豆间作(M2S2F)和4行玉米/2行大豆间作(M4S2F),有机肥等氮替代化肥模式下2行玉米/2行大豆间作(M2S2O)和4行玉米/2行大豆间作(M4S2O),青贮玉米单作(M)和饲用大豆单作(S),共6个处理,探究种植模式和有机肥等氮替代化肥对作物系统干物质产量、粗蛋白产量、土地当量比、种间竞争系数、水分利用效率及经济效益的影响。结果表明:有机肥等氮替代化肥在两地均表现出稳产效应,能有效减少化肥施用量。两地间作系统的干物质产量介于青贮玉米和饲用大豆单作之间,种植模式和有机肥等氮替代化肥对两地系统粗蛋白产量无显著影响。在西峰点,100%无机氮肥模式下的间作模式都具有间作优势且饲用大豆竞争力强于青贮玉米,各间作系统的水分利用效率都高于单作的加权平均值,其中M4S2F处理综合表现最优,其干物质产量、粗蛋白产量和干物质水分利用效率分别达到25.9 t·hm⁻²、2.86 t·hm⁻²和90.49 kg·hm⁻²·mm⁻¹;干物质水分利用效率较单作提高了22.0%,净收入最高,为24690 CNY·hm⁻²。在环县点,2行玉米/2行大豆间作模式具有土地利用优势,青贮玉米在各间作处理下均处于竞争优势。M2S2O模式综合表现最优,其干物质产量、粗蛋白产量和干物质水分利用效率分别达到17.2 t·hm⁻²、1.98 t·hm⁻²和57.63 kg·hm⁻²·mm⁻¹;干物质水分利用效率较单作提高了8.5%,净收入最高,为16052 CNY·hm⁻²。因此,建议在黄土高原的台塬区推广100%无机氮肥+4行玉米/2行大豆间作模式,在丘陵沟壑区推广有机肥等氮替代化肥+2行玉米/2行大豆间作模式。

关键词:有机肥等氮替代化肥;青贮玉米/饲用大豆间作;饲草产量;水分利用效率

Effects of replacing chemical fertilizers with organic fertilizer at equivalent nitrogen levels on forage yield and water use efficiency in a silage maize/forage soybean intercropping system in dryland areas

ZANG Jia-yi^{1,2,3}, XU Ming-jie^{1,2,3}, XIE Ji-cheng^{1,2,3}, SHEN Yu-ying^{1,2,3}, LAI Xing-fa^{1,2,3*}

1. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 3. National Field Scientific Observation and Research Station of Grassland Agro-ecosystems in Gansu Qingyang, Qingyang 745004, China

收稿日期:2025-04-17;改回日期:2025-06-11

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(24ZYQA049),国家重点研发计划(2022YFD1300803),环县科技重大项目计划(HX-STK-2024A-012)和中央高校基本科研业务费(lzujbky-2023-50)项目资助。

作者简介:臧家艺(2000—),女,河北保定人,在读硕士。E-mail: zangjy2023@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: laixingfa@lzu.edu.cn

Abstract: The aim of this research was to examine the impact of replacing chemical fertilizer with organic fertilizer at equivalent nitrogen levels, and the effects of varying intercropping ratios, on the forage yield and water use efficiency (WUE) within a silage maize/forage soybean intercropping system in the Loess Plateau region. The experiments were conducted in the tableland region (Xifeng) and the hilly gully region (Huanxian) of the Longdong Loess Plateau in 2024. Six treatments were established, as follows: 100% chemical nitrogen fertilizer with two rows of maize/two rows of soybean (M2S2F) and four rows of maize/two rows of soybean (M4S2F); replacement of chemical fertilizer with organic fertilizer at an equivalent nitrogen level with two rows of maize/two rows of soybean (M2S2O) and four rows of maize/two rows of soybean (M4S2O); and silage maize monoculture (M) and forage soybean monoculture (S). We investigated the effects of these cropping patterns and organic fertilizer substitution on the system's dry matter yield, crude protein yield, land equivalent ratio, interspecific competition coefficient, WUE, and economic benefits. The results show that substitution with organic fertilizer led to yield stabilization at both sites, while reducing the application rate of chemical fertilizers. At both sites, the dry matter yields of intercropping systems were in between those of the maize and soybean monocultures. Neither the planting pattern nor the substitution with organic fertilizer significantly affected the system's crude protein yield. At Xifeng, intercropping systems with 100% chemical nitrogen fertilizers demonstrated several advantages, with forage soybean exhibiting stronger competitiveness than silage maize. All intercropping systems had higher WUE than the average values of monocultures. At Xifeng, M4S2F exhibited the optimal overall performance, with a dry matter yield of $25.9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, crude protein yield of $2.86 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, and WUE based on dry matter yield of $90.49 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, reflecting a 22.0% increase compared with monocultures. It also achieved a maximum net income of $24690 \text{ CNY}\cdot\text{ha}^{-1}$. At Huanxian, the intercropping system consisting of two rows of maize/two rows of soybean exhibited higher land use benefits, with silage maize maintaining competitive dominance across all intercropping treatments. At Huanxian, M2S2O demonstrated the optimal overall performance, with a dry matter yield of $17.2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, crude protein yield of $1.98 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, WUE based on dry matter yield of $57.63 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, and net income of $16052 \text{ CNY}\cdot\text{ha}^{-1}$. This reflected an 8.5% increase in WUE based on dry matter yield compared with monocultures. In conclusion, it is recommended to adopt 100% chemical fertilizer with a four rows of maize/two rows of soybean intercropping system in the tableland region of the Loess Plateau, and to replace chemical fertilizers with organic fertilizer at an equivalent nitrogen level and use a two rows of maize/two rows of soybean intercropping system in the hill-gully region of the Loess Plateau.

Key words: organic fertilizer substitution with equivalent nitrogen for chemical fertilizers; silage maize/forage soybean intercropping system; forage yield; water use efficiency

随着我国居民膳食结构的不断升级,对草畜产品的需求呈现快速增长趋势,畜牧业发展面临饲草资源短缺与粮食安全保障的双重压力^[1]。间作被称为传统农业的精华,通过作物的时空生态位分化实现资源互补利用,其增产增效机制得到广泛验证^[2-3]。研究指出,禾本科/豆科的间作组合优势最显著^[4],其中玉米(*Zea mays*)/大豆(*Glycine max*)间作主要发挥边际效应来提高单位面积产量,同时通过养分互补可减少化肥投入^[5]。青贮玉米因其富含可溶性碳水化合物的特性,在青贮过程中可作为优质发酵底物,但当前国内主推的粮饲兼用型玉米、高产青贮型玉米等品种普遍存在粗蛋白含量偏低(7%~9%)和纤维成分偏高等缺陷,单独青贮难以满足畜禽的营养需求^[6]。饲用大豆虽然具备高蛋白优势,却因含水量高、可溶性糖不足及缓冲能过高的特性,单独青贮时不利于乳酸菌发酵,导致饲料酸败、贮存期缩短等问题^[7]。采用青贮玉米与饲用大豆进行间作,统一收获后混合青贮,可充分发挥间作增产优势,两者混贮既可弥补青贮玉米的蛋白不足,又能破解饲用大豆的青贮技术瓶颈,对提供优质青贮饲草以及提高青贮饲料营养价值和贮存稳定性具有重要意义^[8]。

氮是影响作物生长的重要元素,合理施氮能够提高作物产量。然而,我国农业生产中普遍存在化学氮肥施用过量问题,导致其利用率低下,不仅造成资源的极大浪费,还严重破坏土壤结构和理化性质,也引发农业面源污染等环境问题^[9-10]。有机肥作为一种环境友好型肥料,与化肥相比,其养分更加全面、肥力持久且污染程度小^[11],但有机肥单施时肥效缓慢,可能导致作物生长前期养分供应不足。将化肥和有机肥进行配施能够实现速效养分与缓释养分的协同互补,保障农作物全生育期的营养需求。这种施肥模式不仅显著提高作物产量与肥料利用效率^[12],还能优化土壤孔隙结构和氮素循环,有效抑制氮素淋溶损失^[13],同时促进土壤微生物群落的结构优化与功能提升。季佳鹏等^[14]在东北黑钙土区研究表明,有机肥等氮替代化肥可显著提高耕层土壤有机碳和速效养分含量,可促进玉米增产 10.1%~13.6%。吴金芝等^[15]的研究表明,通过秸秆还田结合有机肥替代部分化肥不仅能提高玉米和小麦 (*Triticum aestivum*) 的籽粒蛋白产量,还能提升化肥农学效率。

黄土高原地区是我国重要旱作农业区,也是我国北方农牧交错带的核心区域。近年来草食畜牧业飞速发展,对优质饲草的需求不断增大,该区域饲草自给率不足 60%,供需严重失衡^[10]。青贮玉米是该地区主要推广的优质饲料作物,饲用大豆具有高蛋白优势,二者间作能显著提高饲草产量和品质,有效缓解当地优质饲草短缺的问题。然而,目前关于青贮玉米与饲用大豆间作系统在有机无机肥配施协同增效方面研究相对较少。基于此,本研究选取陇东黄土高原地区的台塬区和丘陵沟壑区两类典型地区,以青贮玉米/饲用大豆间作系统为对象,通过有机肥等氮替代部分化肥,探究有机肥等氮替代化肥对间作系统饲草产量、水分利用和经济效益的影响,以明确陇东黄土高原不同地区的最适种植模式和施肥策略,为该区域饲草高效可持续生产提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究于 2024 年选取陇东黄土高原具有代表性的台塬地貌特征的西峰点和丘陵沟壑区地貌特征的环县点开展试验。其中西峰点在甘肃庆阳草地农业生态系统国家野外科学观测研究站(35°39' N, 107°51' E, 海拔 1297 m)开展,位于甘肃省庆阳市西峰区什社乡境内,属温带大陆性季风气候,多年平均年降水量 552.6 mm,且降水集中分布于 7—9 月,多年平均气温 10.7 °C。试验土壤类型为粉壤土,播种前 0~60 cm 土层土壤 pH 值 8.2,有机质含量 15.8 g·kg⁻¹,全氮 0.8 g·kg⁻¹,速效氮 24.7 mg·kg⁻¹,速效磷 32.8 mg·kg⁻¹,速效钾 101.6 mg·kg⁻¹。环县点在木钵镇关营村(36°27' N, 107°26' E, 海拔 1177 m)开展,属温带大陆性半干旱气候,多年平均年降水量 439.9 mm,多年平均气温 9.8 °C。试验土壤类型为砂质黄土,播种前 0~60 cm 土层土壤 pH 值 7.8,有机质含量 8.4 g·kg⁻¹,全氮 0.5 g·kg⁻¹,速效氮 16.4 mg·kg⁻¹,速效磷 8.5 mg·kg⁻¹,速效钾 111.1 mg·kg⁻¹。西峰点(a)和环县点(b)2024 年以及多年(2001—2024 年)平均月降水量和平均月气温变化如图 1 所示。2024 年,西峰点年降水量为 461.3 mm,较多年平均年降水量减少 91.3 mm;环县点年降水量为 492.7 mm,较多年平均年降水量增加 52.8 mm。

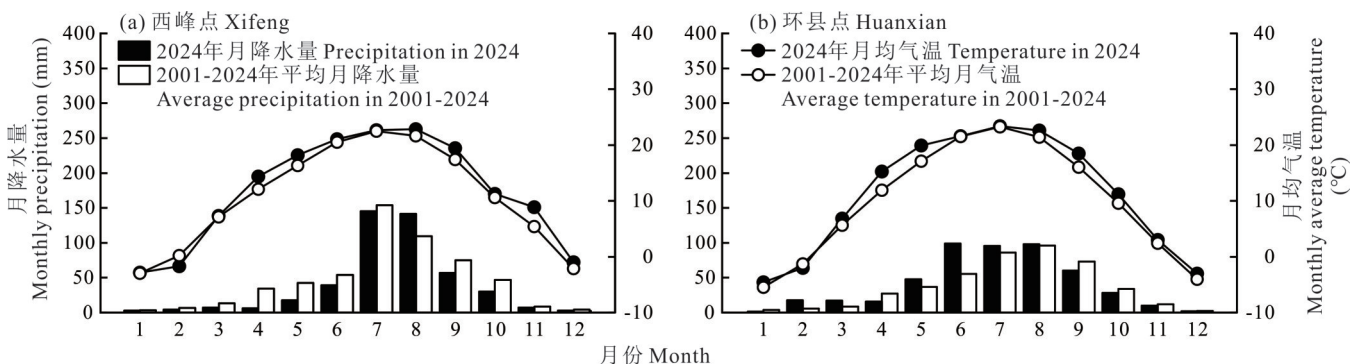


图 1 2024 年西峰点(a)和环县点(b)及多年(2001—2024)月降水量和月均气温

Fig. 1 Monthly precipitation and temperature in 2024 and the long-term (2001—2024) average values at Xifeng (a) and Huanxian (b)

1.2 试验设计与田间管理

本试验共6个处理(表1),分别为100%无机氮肥模式下2行玉米/2行大豆间作(M2S2F)和4行玉米/2行大豆间作(M4S2F),有机肥等氮替代化肥模式下2行玉米/2行大豆间作(M2S2O)和4行玉米/2行大豆间作(M4S2O),青贮玉米单作(M)和饲用大豆单作(S),所有处理采用随机区组设计,设3次重复。供试玉米品种为金穗1915(粮饲兼用型),供试大豆为兰州大学庆阳国家站在西峰点经多年栽培选育得到的试验材料Ls3(饲用型),其原始亲本是来自华南地区的华夏3号。

根据两地多年气候数据和当地农民生产实践,设定了相应的种植密度和施肥量。在西峰点:玉米/大豆间作及单作的所有处理行距均为40 cm,玉米株距33.3 cm,玉米每穴1株,播种密度75000株·hm⁻²,大豆株距20 cm,大豆每穴2株,播种密度250000株·hm⁻²。100%无机氮肥模式下玉米条带施200 kg N·hm⁻²的无机肥,大豆条带施120 kg N·hm⁻²的无机肥;有机肥等氮替代化肥模式下玉米条带施120 kg N·hm⁻²的无机肥+80 kg N·hm⁻²的有机肥,有机肥氮替代化肥氮比例为40%,大豆条带施120 kg N·hm⁻²的无机肥。玉米和大豆单作小区面积为3.2 m×7.0 m,M2S2F和M2S2O处理小区面积为4.8 m×7.0 m,M4S2F和M4S2O处理小区面积为7.2 m×7.0 m,每个间作小区都包括3个完整的间作带幅。在环县点,玉米/大豆间作及单作的所有处理行距均为60 cm,玉米株距25 cm,玉米每穴1株,播种密度67000株·hm⁻²,大豆株距20 cm,大豆每穴2株,播种密度167000株·hm⁻²。100%无机氮肥模式下玉米条带施180 kg N·hm⁻²的无机肥,大豆条带施80 kg N·hm⁻²的无机肥;有机肥等氮替代化肥模式下玉米条带施108 kg N·hm⁻²的无机肥+72 kg N·hm⁻²的有机肥,有机肥氮替代化肥氮比例为40%,大豆条带施80 kg N·hm⁻²的无机肥。玉米和大豆单作小区面积为4.8 m×7.0 m,M2S2F和M2S2O处理小区面积为7.2 m×7.0 m,M4S2F和M4S2O处理小区面积为10.8 m×7.0 m,每个间作小区都包括3个完整的间作带幅(图2)。试验所需磷酸二胺(N≥18%、P₂O₅≥46%)和商品有机肥(N≥4%)在播前作基肥施入,尿素(N≥46%)于玉米大喇叭口期作追肥施入。西峰点玉米和大豆于2024年4月27日播种,于8月31日收获;环县点玉米和大豆于2024年4月23日播种,于9月3日收获。所有处理病虫害的防治措施与当地生产实践保持一致。

表1 试验设计

Table 1 Experiment design

种植模式 Planting patterns	施氮模式 Nitrogen fertilizer patterns	处理编号 Codes of treatment
青贮玉米单作 Silage maize monoculture	100% 无机氮肥 100% inorganic nitrogen fertilizer	M
饲用大豆单作 Forage soybean monoculture	100% 无机氮肥 100% inorganic nitrogen fertilizer	S
2行玉米/2行大豆 2 rows of maize/2 rows of soybean	100% 无机氮肥 100% inorganic nitrogen fertilizer	M2S2F
	有机肥等氮替代化肥 Organic fertilizer substitution with equivalent nitrogen for chemical fertilizers	M2S2O
4行玉米/2行大豆 4 rows of maize/2 rows of soybean	100% 无机氮肥 100% chemical nitrogen fertilizers	M4S2F
	有机肥等氮替代化肥 Organic fertilizer substitution with equivalent nitrogen for chemical fertilizers	M4S2O

1.3 测定指标及方法

1.3.1 干物质产量和粗蛋白产量 在玉米乳熟后期进行收获及取样。鲜草产量(fresh forage yield, Y_F)为收获时全区地上部分收获称重的鲜生物量(留茬5 cm),间作小区玉米和大豆分开称重。同时分别随机选取长势均匀的3株玉米和大豆,带回实验室于烘箱中105℃杀青30 min,之后75℃烘干至恒重,计算干鲜比,折算每hm²干物质产量(dry matter yield, Y_{DM})。将烘干的全株玉米和大豆样品分别粉碎后过1 mm筛,采用凯氏定氮法测定样品粗蛋白含量(crude protein, CP)^[16],利用公式1计算样品粗蛋白产量(crude protein yield, Y_{CP})。间作系统的鲜

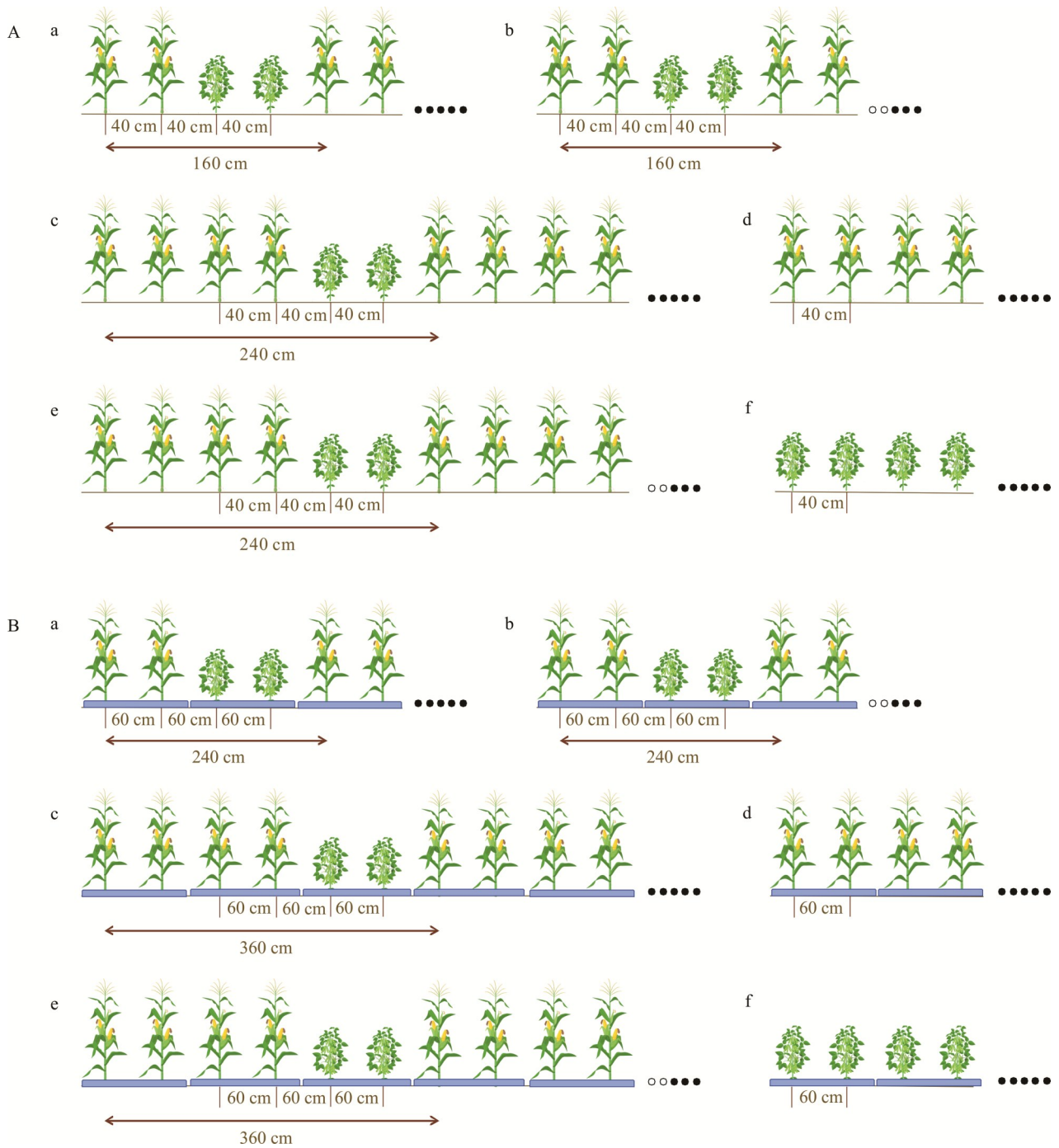


图 2 西峰点(A)和环县点(B)不同种植模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different planting patterns at Xifeng (A) and Huanxian (B)

图中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别代表M2S2F、M2S2O、M4S2F、M、M4S2O和S;黑点代表化学氮肥,白点代表有机肥。Figures (a), (b), (c), (d), (e), and (f) represent M2S2F, M2S2O, M4S2F, M, M4S2O, and S, respectively; black dots represent chemical nitrogen fertilizers and white dots represent organic fertilizers.

草产量、干物质产量和粗蛋白产量通过两种作物产量的加权平均值计算^[17]。

$$Y_{CP}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = Y_{DM}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times CP(\%) \quad (1)$$

1.3.2 耗水量和水分利用效率 在玉米播种期和收获期,采用烘干法测定0~100 cm土层土壤含水量(soil water content, SWC),单作处理在作物行间测定,间作处理分别在玉米条带中心、大豆条带中心进行测定,并计算土壤贮水量(soil water storage, SWS)^[18]。

根据水量平衡公式计算作物生育期内耗水量(water use, WU)^[19],计算公式如下:

$$WU = P + I + S + \Delta SWS - D - R \quad (2)$$

式中: P 为生育期内的有效降水量, I 为灌溉水量, S 为地下水补给量, ΔSWS 为系统生育期始末土壤贮水量的变化量, D 为深层土壤水分渗漏量, R 为地表径流量。试验区为旱作农业,试验期间无灌溉,地势平坦、土层深厚,故 I 、 R 、 S 和 D 均可忽略不计。公式中各项指标的单位均为mm。

作物水分利用效率(water use efficiency, WUE)采用公式3计算^[20],公式如下:

$$WUE_{DM} = \frac{Y_{DM}}{WU} \quad (3)$$

式中: WUE_{DM} 为干物质水分利用效率($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$), Y_{DM} 为收获期作物干物质产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), WU 为作物生育期耗水量(mm)。粗蛋白水分利用效率(WUE_{CP})计算同理。

通过计算间作系统相对于单作系统的耗水量变化量(ΔWU)和水分利用效率变化量(ΔWUE)来表征间作群体的水分利用情况,计算公式如下^[21]:

$$\Delta WU = WU_1 / (p_M WU_{SM} + p_S WU_{SS}) - 1 \quad (4)$$

$$\Delta WUE = WUE_1 / (p_M WUE_{SM} + p_S WUE_{SS}) - 1 \quad (5)$$

式中: WU_1 、 WU_{SM} 和 WU_{SS} 分别是间作系统、单作玉米和单作大豆的耗水量(mm); WUE_1 、 WUE_{SM} 和 WUE_{SS} 分别是间作系统、单作玉米和单作大豆的水分利用效率($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$); p_M 和 p_S 分别为间作系统中玉米和大豆所占的土地比例。 $\Delta WU > 0$,表示间作系统的耗水量大于单作的加权平均值,反之则小于单作的加权平均值; $\Delta WUE > 0$,表示间作系统的水分利用效率大于单作的加权平均值,反之则小于单作的加权平均值。

1.3.3 土地当量比和竞争指数 采用土地当量比(land equivalent ratio, LER)量化间作群体土地利用效率^[22];采用玉米相对于大豆的侵占力(aggressivity, A_{MS})^[23-24]和竞争比率(competition ratio, CR_{MS})^[23-24]量化间作群体种间竞争强弱。计算公式如下:

$$LER_M = Y_{IM} / Y_{SM} \quad (6)$$

$$LER_S = Y_{IS} / Y_{SS} \quad (7)$$

$$LER = LER_M + LER_S \quad (8)$$

式中: Y_{IM} 、 Y_{IS} 为间作玉米、大豆产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), Y_{SM} 、 Y_{SS} 为单作玉米、大豆产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), LER_M 、 LER_S 为玉米、大豆偏土地当量比。 $LER > 1$ 为间作优势; $LER < 1$ 为间作劣势。

$$A_{MS} = (Y_{IM} / Y_{SM}) - (Y_{IS} / Y_{SS}) \quad (9)$$

式中: A_{MS} 为玉米相对于大豆的侵占力。 $A_{MS} > 0$,表示玉米的竞争能力强于大豆; $A_{MS} < 0$,表示玉米的竞争能力弱于大豆。

$$CR_{MS} = (Y_{IM} / Y_{SM}) / (Y_{IS} / Y_{SS}) \quad (10)$$

式中: CR_{MS} 为玉米相对于大豆的竞争比率。 $CR_{MS} > 1$,表示玉米的竞争能力强于大豆; $CR_{MS} < 1$,表示玉米的竞争能力弱于大豆。

1.3.4 经济效益 经济效益(economic benefit, EB , $\text{CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$)计算公式为:

$$EB = P_F \times Y_F - S_C - F_O - O_C \quad (11)$$

式中: P_F 为饲草单价,按当地2024年饲草市场价格计,青贮玉米单价为425 $\text{CNY}\cdot\text{t}^{-1}$,饲用大豆单价为400 $\text{CNY}\cdot\text{t}^{-1}$,玉米大豆混合饲草单价为550 $\text{CNY}\cdot\text{t}^{-1}$; S_C 为种子费用,西峰点玉米种子费用为1000 $\text{CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、大豆种子费用为1247 $\text{CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$,环县点玉米种子费用为1125 $\text{CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、大豆种子费用为820 $\text{CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$; F_O 为肥料费用,尿素价格为3 $\text{CNY}\cdot\text{kg}^{-1}$,磷酸二铵价格为4 $\text{CNY}\cdot\text{kg}^{-1}$,商品有机肥价格为1.1 $\text{CNY}\cdot\text{kg}^{-1}$; O_C 为其他费用的总和,包括人工和机械费用(环县点还包括地膜及覆膜费用),西峰点其他费用共计6225 $\text{CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$,环县点共计7275 $\text{CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2019软件整理数据,利用IBM SPSS Statistics 26软件对6个种植模式进行单因素方差分析,采用

最小显著差异法进行多重比较($P=0.05$),采用 T 检验比较间作模式在 100% 无机氮肥和有机肥等氮替代化肥处理之间的差异,采用 Origin 2021 作图。图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 系统干物质产量和粗蛋白产量

种植模式对两地点系统干物质产量均有显著影响($P<0.05$,图 3)。在间作系统中,西峰点 M4S2F 处理干物质产量最高,为 $25.90 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;环县点 M4S2F 和 M2S2O 处理干物质产量较高,均为 $17.20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各种植模式系统粗蛋白产量在西峰点存在显著差异,其中 M4S2F 和 M2S2F 处理系统粗蛋白产量较高,均为 $2.86 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而环县点系统粗蛋白产量在各种植模式之间无显著差异。此外,有机肥等氮替代化肥对两地系统干物质产量和粗蛋白产量均无显著影响($P>0.05$)。

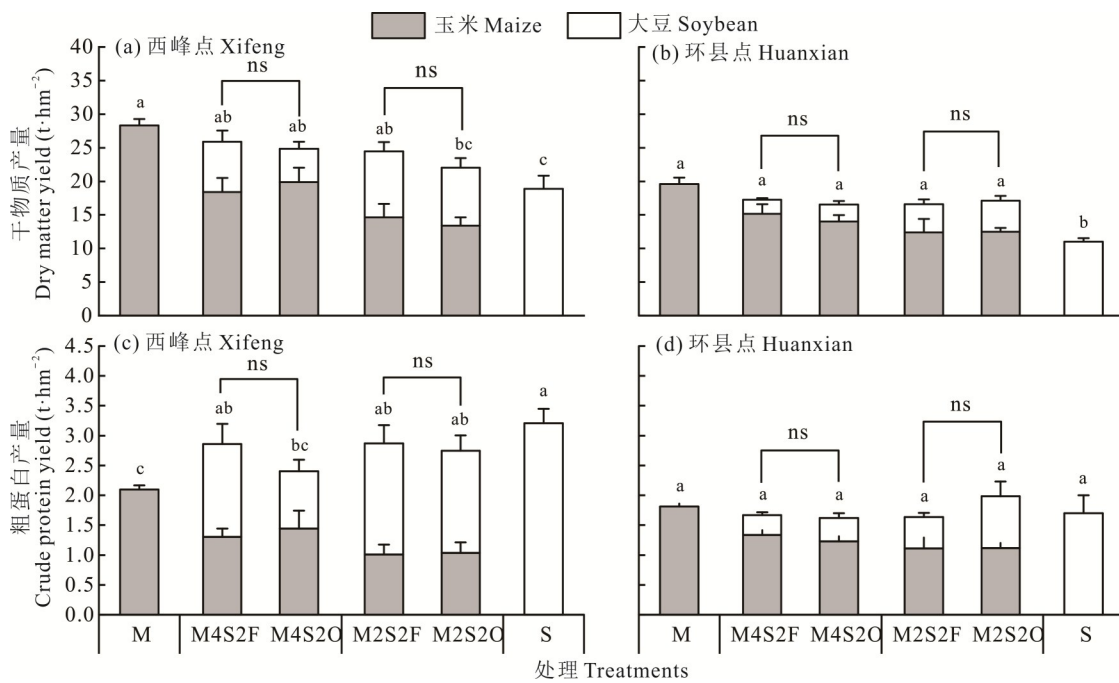


图 3 西峰点和环县点两地青贮玉米/饲用大豆间作系统干物质产量(a, b)和粗蛋白产量(c, d)

Fig. 3 System dry matter yield (a, b) and crude protein yield (c, d) values in the silage maize/forage soybean intercropping systems at Xifeng and Huanxian

不同小写字母表示不同处理间在 5% 的概率水平上差异显著;分别对相同种植模式不同施肥模式下的系统干物质产量和粗蛋白产量进行独立样本 T 检验, ns 表示两者差异不显著。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 5% probability level; Independent samples T -tests was performed for dry matter yield and crude protein yield of the systems under different fertilization patterns of the same cropping pattern, respectively, and ns indicates that the differences are not significant.

2.2 系统土地当量比和种间竞争作用

在西峰点, M4S2F 处理 LER_{DM} 和 LER_{CP} 均最大, 分别为 1.05 和 1.11。M4S2F 与 M2S2F 的 LER_{DM} 和 LER_{CP} 均大于 1, 表明 100% 无机氮肥模式下两种间作比例在 DM 产量与 CP 产量方面均表现出间作优势。玉米 4 行/大豆 2 行间作系统中玉米、大豆的种植比例分别为 0.67、0.33, 玉米 2 行/大豆 2 行间作系统中玉米、大豆的种植比例均为 0.50。根据 DM 产量计算 M2S2F 玉米和大豆的偏土地当量比 $LER_{DM,M}$ 和 $LER_{DM,S}$ 都大于其种植比例, 表明间作同时提高了玉米和大豆的干物质产量, 呈现出总体间作优势(表 2)。

在环县点, M2S2O 处理 LER_{DM} 和 LER_{CP} 均最大, 分别为 1.06 和 1.13。从 DM 产量角度, M2S2F 和 M2S2O 处理 LER 均大于 1, 表明环县点 M2S2F 和 M2S2O 均具有间作优势。从 CP 产量角度, M2S2O 玉米和大豆的偏土地当量比均大于其种植比例, 说明同时提高了玉米和大豆的粗蛋白产量, 表现出总体间作优势。此外, 环县点玉米

基于DM与CP产量的偏土地当量比 $LER_{DM,M}$ 、 $LER_{CP,M}$ 均大于其种植比例,说明在环县点玉米处于竞争优势,大豆生长受抑制(表2)。

在西峰点, M4S2F和M2S2F处理下 CR_{MS} 小于1,而M4S2O和M2S2O模式下 CR_{MS} 大于1,说明西峰点在100%无机氮肥模式下大豆的营养竞争能力大于玉米,有机肥等氮替代化肥模式下则相反, A_{MS} 也呈现出相似的规律。而在环县点,所有处理 CR_{MS} 均大于1, A_{MS} 均大于0,表明在环县点玉米的竞争能力强于大豆(表3)。

表2 西峰点和环县点两地青贮玉米/饲用大豆间作系统基于干物质(DM)产量和粗蛋白质(CP)产量的土地当量比(LE R)

Table 2 Land equivalent ratio (LE R) based on dry matter (DM) yield and crude protein (CP) yield in the silage maize/forage soybean intercropping systems at Xifeng and Huanxian

处理 Treatment	$LE\mathit{R}_{DM}$					
	西峰点 Xifeng			环县点 Huanxian		
	$LE\mathit{R}_{DM}$	$LE\mathit{R}_{DM,M}$	$LE\mathit{R}_{DM,S}$	$LE\mathit{R}_{DM}$	$LE\mathit{R}_{DM,M}$	$LE\mathit{R}_{DM,S}$
M4S2F	1.05±0.06a	0.65±0.07ab	0.40±0.09ab	0.96±0.05a	0.77±0.07a	0.19±0.02c
M4S2O	0.96±0.05a	0.70±0.08a	0.26±0.06b	0.95±0.05a	0.71±0.05a	0.23±0.04bc
M2S2F	1.04±0.01a	0.52±0.07ab	0.52±0.07a	1.01±0.09a	0.63±0.10a	0.38±0.06ab
M2S2O	0.93±0.05a	0.47±0.04b	0.46±0.08ab	1.06±0.09a	0.64±0.03a	0.42±0.06a

处理 Treatment	$LE\mathit{R}_{CP}$					
	西峰点 Xifeng			环县点 Huanxian		
	$LE\mathit{R}_{CP}$	$LE\mathit{R}_{CP,M}$	$LE\mathit{R}_{CP,S}$	$LE\mathit{R}_{CP}$	$LE\mathit{R}_{CP,M}$	$LE\mathit{R}_{CP,S}$
M4S2F	1.11±0.06a	0.62±0.07a	0.48±0.11a	0.94±0.02a	0.74±0.04a	0.20±0.03b
M4S2O	0.99±0.12a	0.69±0.14a	0.30±0.06b	0.91±0.08a	0.68±0.05a	0.23±0.05b
M2S2F	1.06±0.03a	0.48±0.08a	0.58±0.10a	0.92±0.06a	0.61±0.10a	0.31±0.04ab
M2S2O	1.03±0.04a	0.49±0.08a	0.53±0.08a	1.13±0.19a	0.62±0.05a	0.51±0.14a

注: $LE\mathit{R}_{DM,M}$ 为基于干物质产量的玉米偏土地当量比, $LE\mathit{R}_{DM,S}$ 为基于干物质产量的大豆偏土地当量比, $LE\mathit{R}_{CP,M}$ 为基于粗蛋白质产量的玉米偏土地当量比, $LE\mathit{R}_{CP,S}$ 为基于粗蛋白质产量的大豆偏土地当量比。同列数字后不同小写字母表示在5%的概率水平上差异显著。下同。

Note: $LE\mathit{R}_{DM,M}$ is the maize partial land equivalent ratio based on dry matter yield, $LE\mathit{R}_{DM,S}$ is the soybean partial land equivalent ratio based on dry matter yield, $LE\mathit{R}_{CP,M}$ is the maize partial land equivalent ratio based on crude protein yield, $LE\mathit{R}_{CP,S}$ is the soybean partial land equivalent ratio based on crude protein yield. Different lowercase letters following numbers in the same column indicate significant differences at the 5% probability level. The same below.

表3 西峰点和环县点两地青贮玉米/饲用大豆间作系统的玉米相对于大豆的侵占力(A_{MS})和竞争比率(CR_{MS})

Table 3 The aggressivity of maize relative to soybean (A_{MS}) and competition ratio (CR_{MS}) in the silage maize/forage soybean intercropping systems at Xifeng and Huanxian

处理 Treatment	西峰点 Xifeng		环县 Huanxian	
	A_{MS}	CR_{MS}	A_{MS}	CR_{MS}
M4S2F	-0.002±0.000b	0.928±0.236a	0.580±0.098a	2.147±0.522a
M4S2O	0.437±0.121a	1.473±0.367a	0.484±0.076ab	1.713±0.459a
M2S2F	-0.003±0.000b	0.981±0.215a	0.250±0.147b	1.797±0.517a
M2S2O	0.016±0.001ab	1.115±0.240a	0.219±0.036b	1.575±0.177a

注: A_{MS} 为玉米相对于大豆的侵占力, CR_{MS} 为竞争比率。

Note: A_{MS} denotes the aggressivity of maize relative to soybean, and CR_{MS} denotes the competition ratio.

2.3 系统耗水量和水分利用效率

在西峰点,种植模式对 WUE_{DM} 和 WUE_{CP} 均有极显著影响($P<0.01$),间作系统的耗水量低于单作的加权平

均值。从水分利用效率角度,各间作处理下 ΔWUE_{DM} 和 ΔWUE_{CP} 都大于0,表明西峰点间作系统在 WUE_{DM} 和 WUE_{CP} 表现均优于单作的加权平均值。在M4S2F处理下, WUE_{DM} 和 WUE_{CP} 均最大,分别为 $90.49 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $9.99 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,分别比单作的加权平均值高22.0%和36.0%(表4)。在环县点,间作系统耗水量高于单作的加权平均值。种植模式对 WUE_{DM} 有极显著影响($P<0.01$),M2S2O和M2S2F处理的 WUE_{DM} 大于青贮玉米和饲用大豆单作的加权平均值,而M4S2O和M4S2F处理的 WUE_{DM} 小于两种作物单作的加权平均值。种植模式和有机肥等氮替代化肥对 WUE_{CP} 有显著影响($P<0.05$)。在M2S2O处理下, WUE_{DM} 和 WUE_{CP} 均最大,分别为 $57.63 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $6.67 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,分别比单作的加权平均值高8.5%和9.7%(表4)。

表 4 西峰点和环县点两地青贮玉米/饲用大豆间作和单作系统的耗水量(WU)、水分利用效率(WUE)及间作系统相对于单作耗水量(ΔWU)和水分利用效率(ΔWUE)的变化量

Table 4 Water consumption (WU) and water use efficiency (WUE) of the silage maize/forage soybean intercropping and monoculture systems, and changes in water consumption (ΔWU) and water use efficiency (ΔWUE) of intercropping systems relative to monocultures at Xifeng and Huanxian

处理 Treatment	西峰点 Xifeng					
	WU (mm)	ΔWU	WUE_{DM} ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)	ΔWUE_{DM}	WUE_{CP} ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)	ΔWUE_{CP}
M	344.5±3.5a	—	82.23±0.85a	—	6.09±0.06c	—
M4S2F	286.8±10.8a	-0.15±0.03a	90.49±3.52a	0.22±0.05a	9.99±0.39a*	0.36±0.05a*
M4S2O	305.0±13.1a	-0.10±0.02a	81.70±3.42a	0.10±0.01a	7.90±0.33b*	0.08±0.01b*
M2S2F	303.6±22.1a	-0.09±0.02a	81.48±6.38a	0.16±0.04a	9.55±0.75ab	0.20±0.03ab
M2S2O	291.1±28.3a	-0.13±0.03a	77.23±8.04a	0.10±0.02a	9.62±1.00ab	0.21±0.03ab
S	325.7±7.0a	—	57.97±1.25b	—	9.85±0.21a	—
处理 Treatment	环县点 Huanxian					
	WU (mm)	ΔWU	WUE_{DM} ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)	ΔWUE_{DM}	WUE_{CP} ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)	ΔWUE_{CP}
M	287.6±6.0a	—	68.25±1.41a	—	6.31±0.13ab	—
M4S2F	335.2±12.9a	0.16±0.03a	51.62±2.03b	-0.11±0.02b	4.99±0.20c	-0.19±0.03b
M4S2O	303.0±23.8a	0.05±0.01a	55.31±4.03b	-0.05±0.01ab	5.41±0.39bc	-0.12±0.03b
M2S2F	309.5±22.2a	0.07±0.01a	54.11±3.83b	0.02±0.00ab	5.34±0.38bc*	-0.12±0.02b
M2S2O	297.7±6.6a	0.02±0.00a	57.63±1.30b	0.09±0.02a	6.67±0.15a*	0.10±0.01a
S	293.4±19.2a	—	37.93±2.66c	—	5.86±0.41abc	—

注: WUE_{DM} 、 WUE_{CP} 为基于干物质产量、粗蛋白产量的水分利用效率, ΔWUE_{DM} 、 ΔWUE_{CP} 为基于干物质产量、粗蛋白产量的水分利用效率变化。各处理的值为平均效应值。对间作模式在100%无机氮肥和有机肥等氮替代化肥处理之间的差异进行T检验,*表示两者差异显著($P<0.05$)。“—”表示无数据。

Note: WUE_{DM} and WUE_{CP} represent water use efficiency based on dry matter yield and crude protein yield, respectively. ΔWUE_{DM} and ΔWUE_{CP} denote the changes in water use efficiency based on dry matter yield and crude protein yield. Values for each treatment represent the mean effect size. Differences between the intercropping patterns under 100% chemical nitrogen fertilizer and organic fertilizer substitution with equivalent nitrogen for chemical fertilizer were analyzed using T-tests, where * denotes a significant difference between them ($P<0.05$). “—” indicates no data.

2.4 经济效益

由表5可知,在西峰点,不同施肥模式下4行玉米/2行大豆的系统总产值相较2行玉米/2行大豆更高。M4S2F处理的净收入最高,为 $24690 \text{ CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$,各间作处理下的净收入为 $M4S2F>M2S2F>M4S2O>M2S2O$,较当地传统的玉米单作种植分别提高了35.5%、32.0%、29.7%、15.6%。在环县点,M2S2O处理的总产值和净收入最高,分别达到了 $27272 \text{ CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $16052 \text{ CNY}\cdot\text{hm}^{-2}$,各间作处理下的净收入为 $M2S2O>M2S2F>M4S2F>M4S2O$,较玉米单作相比分别提高了30.7%、28.0%、26.3%、10.7%。

表5 西峰点与环县点两地青贮玉米/饲用大豆间作系统经济效益对比

Table 5 Comparison of economic benefits performance in the silage maize/forage soybean intercropping systems at Xifeng and Huanxian (CNY·hm⁻²)

处理 Treatment	西峰点 Xifeng			环县点 Huanxian		
	总投入 Total input	总产值 Gross output	净收入 Net income	总投入 Total input	总产值 Gross output	净收入 Net income
M	10410	28633±960b	18223±960b	11025	23306±1087a	12281±1087ab
M4S2F	10290	34980±1811a	24690±1811a	10605	26115±1567a	15510±1567a
M4S2O	11415	35056±1812a	23641±1812a	11610	25204±1349a	13594±1349a
M2S2F	10290	34336±696a	24046±696a	10455	26178±2421a	15723±2421a
M2S2O	11130	32198±1477ab	21068±1477ab	11220	27272±2258a	16052±2258a
S	9420	19489±2046c	10069±2046c	9375	16581±789b	7206±789b

注：各处理的总投入为固定值，总产值和净收入为平均效应值。

Note: The total input for each treatment is fixed, while the gross output and net income represent the mean effect size.

3 讨论

3.1 种植模式和有机肥等氮替代化肥对饲草产量、土地利用和经济效益的影响

在西北干旱地区,有机肥矿化受水分胁迫、温度变化、土壤质地及微生物活性等多重制约,呈现矿化速率缓滞、累积量低且峰值滞后于作物需肥关键期的特征。赵凯男等^[25]研究发现宁夏引黄灌区有机肥的矿化周期延长20%~30%。本研究结果表明,有机肥等氮替代化肥对西峰点和环县点两地间作系统干物质产量均无显著影响,在西峰点根据 LER_{DM} 和 LER_{CP} ,100%无机氮肥时各间作处理均表现出间作优势,而有机肥等氮替代化肥模式下无间作优势。可能由于100%无机氮模式下氮的有效性较高,玉米能快速吸收,大豆的生物固氮作用补充了氮源,形成互补^[26];而有机肥氮需要通过微生物矿化释放,干旱或低温延缓矿化速度。因此,当化肥氮被有机肥氮替代时,导致玉米生长关键期氮素供应不足,削弱其与大豆的互补效应,增产潜力受到抑制^[27]。基于DM产量,环县点间作系统在M2S2O和M2S2F处理下 LER 均大于1,具有间作优势;而M4S2O和M4S2F未表现出间作优势,可能是2行玉米与2行大豆间作中每行玉米和大豆均处在边界行,充分发挥了边际效应,玉米和大豆生长的光环境和通风条件得到了改善,能捕获更多底层弱光^[28-29]。此外,基于玉米、大豆的偏土地当量比,玉米相对于大豆的侵占力(A_{MS})和竞争比率(CR_{MS}),表明环县点玉米占优势地位,与任媛媛^[30]的研究结果一致。在黄土高原地区间作系统中,玉米比大豆竞争优势更大,可能是玉米属于 C_4 植物,具有光合途径的高效固碳能力。但在西峰点, A_{MS} 和 CR_{MS} 表明M4S2F和M2S2F模式下大豆的竞争力更强,与环县点以及前人的研究结果^[30]不同。可能是在西峰点水分条件较好,玉米和大豆对于水分的竞争减小,玉米的优势表现不明显。饲用型大豆Ls3经多年栽培选育,已适应当地的气候和环境,表现出良好的增产潜力。但在有机肥等氮替代化肥模式下,间作系统中玉米还是占优势,可能是有机肥在基础水分条件较好的环境下发挥了一定的作用,提高了玉米的竞争力。在环县点,M2S2O处理基于干物质产量和粗蛋白产量的土地当量比均最大,系统的间作优势大,饲草产量高,总产值和净收入最高;而在西峰点,M4S2F处理基于干物质产量和粗蛋白产量的土地当量比均最大,土地利用效率高,系统总产值和净收入较高。因此,基于饲草生产和经济效益,西峰点推荐100%无机氮肥+4行玉米/2行大豆间作模式,而环县点则推荐有机肥等氮替代化肥+2行玉米/2行大豆间作模式。

3.2 种植模式和有机肥等氮替代化肥对系统水分利用的影响

在水资源有限的条件下,间套作复合群体在时间和空间上的生态位分化是土壤水分高效利用的关键,不同作物通过根系分布的互补性来提高水分吸收与利用效率^[31]。研究常通过计算间作系统的耗水量和水分利用效率与相应单作系统加权平均值的差值(ΔWU 和 ΔWUE)来衡量间作系统的水分利用特征。Morris等^[21]的研究表明,作物组合和环境差异会导致间套作系统实际耗水量波动较大,但与相应单作的加权平均值相比差异较小,大多在-6%~7%。本研究在-15%~16%,可能是单作与间作系统裸间蒸发量的差异未被准确测定^[32]。间作的冠层

覆盖减少土壤蒸发,但若试验设计未区分蒸腾与蒸发比例,可能导致总耗水量估算偏差。在环县点,M4S2F和M4S2O处理基于干物质产量的WUE小于单作的加权平均值,可能是由于玉米的行数增加(4行),导致地上部遮阴和地下部根系重叠区域扩大,玉米对光、水等资源的竞争增强。尤其是在降水量不足的黄土丘陵沟壑区,玉米生长的需水量大,挤压大豆的水分获取空间,使大豆受到水分胁迫,导致间作系统整体WUE下降^[33]。在西峰点,各间作系统耗水量均小于单作的加权平均值,相对于单作,间作提高了水分利用效率。可能是由于西峰点行距缩小,间作冠层的覆盖效应提高了蒸腾散发中蒸腾的比例,减少了土壤水分蒸发,从而提高了土壤水分的有效性和转化效率^[34]。此外,玉米为C₄作物,在单作条件下具有最高的水分利用效率,有研究表明C₃/C₄作物间作系统的水分利用效率虽低于C₄作物单作模式,但高于C₃作物单作模式^[35]。本研究除西峰点M4S2F处理外,其他间作系统WUE都大于大豆单作而小于玉米单作,西峰点M4S2F的WUE超过玉米单作可能是该间作模式优势明显,系统增产幅度较大。两地2行玉米/2行大豆粗蛋白水分利用效率高于4行玉米/2行大豆,原因可能是前者大豆占比更大,粗蛋白产量更高,导致系统粗蛋白水分利用效率高。因此,从水分利用效率方面,在西峰点推荐100%无机氮肥+4行玉米/2行大豆间作模式,而环县点则推荐有机肥等氮替代化肥+2行玉米/2行大豆间作模式。

两地推荐模式的差异源于水分可用性对资源竞争关系的调控:在基础水分条件较差的环县,水分是首要限制因子,有机肥等氮替代化肥+2行玉米/2行大豆间作模式通过降低玉米密度缓解水分竞争,同时提升大豆比例以优化系统粗蛋白产出;而在基础水分条件较好的西峰,100%无机氮肥+4行玉米/2行大豆间作模式能够最大化发挥光温生产潜力,玉米作为C₄作物的高光合固碳效率主导了系统干物质积累,并且无机肥氮的快速供应强化了玉米与大豆的氮素互补。

4 结论

在黄土高原地区,有机肥等氮替代化肥在西峰和环县两地均表现出稳产效应,减少了化肥的投入。基于区域生态特征,建议黄土高原台塬区采用100%无机氮肥+4行玉米/2行大豆间作模式,而丘陵沟壑区则采用有机肥等氮替代化肥+2行玉米/2行大豆间作模式,既可保障区域饲草生产和水分高效利用,又能实现经济效益与生态效益的协同提升。

参考文献 References:

- [1] Shou N, Gao W, Shen Y Y, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on yield and water use efficiency of silage maize. *Pratacultural Science*, 2022, 38(7): 1351–1361.
受娜, 高玮, 沈禹颖, 等. 不同施氮量对青贮玉米产量及水分利用效率的影响. *草业科学*, 2022, 38(7): 1351–1361.
- [2] Li Y J, Ma L S, Wu P T, *et al.* Yield, yield attributes and photosynthetic physiological characteristics of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.)/maize (*Zea mays* L.) strip intercropping. *Field Crops Research*, 2020, 248: 107656.
- [3] Monicah M M, Pieter P, Daniel M, *et al.* A staggered maize–legume intercrop arrangement robustly increases crop yields and economic returns in the highlands of Central Kenya. *Field Crops Research*, 2009, 115(2): 132–139.
- [4] Weng Q Y, Huang X J, Xu H L, *et al.* Effects of corn/soybean intercropping model on yield, quality, soil nutrition and rhizosphere microorganisms of silage corn. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(2): 462–470.
瓮巧云, 黄新军, 许翰林, 等. 玉米/大豆间作模式对青贮玉米产量、品质及土壤营养、根际微生物的影响. *核农学报*, 2021, 35(2): 462–470.
- [5] Jiang Z W, Liu G Y, An H Y, *et al.* Effects of planting density and nitrogen application on forage yield, quality and nitrogen use efficiency in a maize/forage soybean intercropping system. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(7): 157–171.
蒋紫薇, 刘桂宇, 安昊云, 等. 种植密度与施氮对玉米/秣食豆间作系统饲草产量、品质和氮肥利用的影响. *草业学报*, 2022, 31(7): 157–171.
- [6] Tang G, Sui D H, Wu X J, *et al.* Research progress on forage of silage corn in China. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2021(9): 26–28, 33.
唐贵, 隋冬华, 武新娟, 等. 我国青贮玉米饲用化研究进展. *黑龙江畜牧兽医*, 2021(9): 26–28, 33.
- [7] Ge J, Liu G H, Yang C J, *et al.* Research progress on mixed silage of *Medicago sativa*. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(9): 6–10, 17.

- 葛剑, 刘贵河, 杨翠军, 等. 紫花苜蓿混合青贮研究进展. 河南农业科学, 2014, 43(9): 6—10, 17.
- [8] Liu Q, Sun Q Z, Hao H, *et al.* Study on alfalfa and corn mixed silage. *China Dairy Cattle*, 2017(1): 59—62.
柳茜, 孙启忠, 郝虎, 等. 紫花苜蓿与全株玉米混合青贮研究. 中国奶牛, 2017(1): 59—62.
- [9] Islam M R, Hu Y G, Mao S S, *et al.* Effectiveness of a water-saving super-absorbent polymer in soil water conservation for maize (*Zea mays* L.) based on eco-physiological parameters. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(11): 1998—2005.
- [10] Cheng J M. Pathways and suggestions for agricultural and animal husbandry development in semi-arid regions of the Loess Plateau. *Gansu Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2017, 47(9): 15, 23.
程积民. 黄土高原半干旱区农牧业发展途径与建议. 甘肃畜牧兽医, 2017, 47(9): 15, 23.
- [11] Li R, Tao R, Ling N, *et al.* Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: Implications for soil biological quality. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 30—38.
- [12] Duan Y H, Xu M G, Gao S D, *et al.* Nitrogen use efficiency in a wheat-maize cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications. *Field Crops Research*, 2014, 157: 47—56.
- [13] Sebito M, Mayer B, Nicolardot B, *et al.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(45): 18185—18189.
- [14] Ji J P, Zhao X Y, Wu J G, *et al.* Replacing 20% of chemical nitrogen with manures to increase soil nutrient availability and maize yield in a chernozem soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3): 491—499.
季佳鹏, 赵欣宇, 吴景贵, 等. 有机肥替代20%化肥提高黑钙土养分有效性及玉米产量. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 491—499.
- [15] Wu J Z, Xiao H S, Guo J H, *et al.* Effects of straw returning combined with organic fertilizer replacing 1/3 chemical fertilizer on grain yield, grain protein and chemical fertilizer use efficiency in dryland maize-wheat double cropping system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 319—326.
吴金芝, 肖慧淑, 郭锦花, 等. 秸秆还田和有机肥配合替代1/3化肥对旱地玉—麦产量、蛋白质含量和化肥利用效率影响. 水土保持学报, 2023, 37(4): 319—326.
- [16] Xiao Z M, Fan X, Ma D X, *et al.* Determination of crude protein in feed-kjeldahl method: GB/T 6432-2018. Beijing: China Standards Press, 2018.
肖志明, 樊霞, 马东霞, 等. 饲料中粗蛋白的测定—凯氏定氮法: GB/T 6432-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [17] Wu Y H. Light and water use of forage maize/alfalfa intercropping system in Loess Plateau. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
吴玉环. 黄土高原饲用玉米/紫花苜蓿间作群体光能及水分利用研究. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [18] Jiang C Z, Shou N, Gao W, *et al.* A multivariate evaluation of production performance and nutritional quality of different varieties of silage maize in the dry plateau area of Longdong. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(7): 216—228.
蒋丛泽, 受娜, 高玮, 等. 陇东旱塬区不同青贮玉米品种生产性能和营养品质综合评价. 草业学报, 2023, 32(7): 216—228.
- [19] Oweis T Y, Farahani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in Northern Syria. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1239—1248.
- [20] Huang Y L, Chen L D, Fu B J, *et al.* The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: straw mulch and irrigation effects. *Agricultural Water Management*, 2005, 72(3): 209—222.
- [21] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: water. *Field Crops Research*, 1993, 34(3): 303—317.
- [22] Yong T W, Liu X M, Song C, *et al.* Effect of planting patterns on crop yield, nutrients uptake and interspecific competition in maize-soybean relay strip intercropping system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(6): 659—667.
雍太文, 刘小明, 宋春, 等. 种植方式对玉米—大豆套作体系中作物产量、养分吸收和种间竞争的影响. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 659—667.
- [23] Yang W T, Li Z X, Wang J W, *et al.* Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected by interspecific competition and nitrogen application. *Field Crops Research*, 2013, 146: 44—50.
- [24] Lithourgidis A S, Vlachostergios D N, Dordas C A, *et al.* Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(4): 287—294.

- [25] Zhao K N, Wu J Z, Li J H, *et al.* Effects of combined straw and organic fertilizer application as partial replacement for chemical fertilizers on water use efficiency and soil nitrate residue. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(10): 1770–1781.
赵凯男, 吴金芝, 李俊红, 等. 秸秆和有机肥配合替代部分化肥提高作物水分利用率减少土壤硝态氮残留. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(10): 1770–1781.
- [26] Zhang W. Regulation of nitrogen use efficiency for dryland maize-soybean intercropping and its mechanism of root-soil response in Loess Plateau. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
张伟. 黄土旱塬玉米/大豆间作体系氮素增效调控及根土响应机制. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [27] Ma Q X, Pan W K, Tang S, *et al.* Maize and soybean experience fierce competition from soil microorganisms for the uptake of organic and inorganic nitrogen and sulphur: A pot test using ^{13}C , ^{15}N , ^{14}C , and ^{35}S labelling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 157: 108260.
- [28] 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.
- [29] Zhao C J, Gao F, Li Z W, *et al.* Effects of different maize/soybean intercropping row ratios on photosynthetic physiological characteristics and yield of soybean. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, 41(5): 820–825, 848.
赵长江, 高菲, 李祯玮, 等. 玉米大豆不同间作行比对大豆光合生理特性及产量的影响. *四川农业大学学报*, 2023, 41(5): 820–825, 848.
- [30] Ren Y Y. Study on water use of maize-soybean intercrops on the Loess Plateau, China. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
任媛媛. 黄土塬区玉米大豆间作系统水分利用研究. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [31] Willey R W. Resource use in intercropping systems. *Agricultural Water Management*, 1990, 17(1): 215–231.
- [32] Chai Q, Yu A Z, Chen G P, *et al.* Soil evaporation under sole cropping and intercropping systems and the main driving factors. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1307–1312.
柴强, 于爱忠, 陈桂平, 等. 单作与间作的棵间蒸发量差异及其主要影响因子. *中国生态农业学报*, 2011, 19(6): 1307–1312.
- [33] An Y W, Shi S Q, Feng L S, *et al.* Productivity enhancement and water use efficiency of maize-soybean intercropping. *Horticulture & Seed*, 2016(9): 80–83.
安颖蔚, 史书强, 冯良山, 等. 玉米/大豆间作提高农田生产力和水分利用效率研究. *园艺与种苗*, 2016(9): 80–83.
- [34] Chai Q. Research progress on mechanism of high efficient water utilization in intercropping system. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2008(4): 11–15.
柴强. 间套复合群体水分高效利用机理研究进展. *中国农业科技导报*, 2008(4): 11–15.
- [35] Wang C L, Guo L Y, Li Y X, *et al.* Systematic comparison of C_3 and C_4 plants based on metabolic network analysis. *BMC Systems Biology*, 2012, 6(Supple 2): S9.