

内蒙古阴山北麓旱农区马铃薯间作模式的生产力与水分利用^①

侯建伟¹, 段玉^{2,3,4,5*}, 张君^{2,3,4,5}, 赵沛义^{2,3,4}, 景宇鹏^{2,3,4,5}

(1 铜仁学院乌江学院, 贵州铜仁 554300; 2 内蒙古农牧业科学院资源环境与检测技术研究所, 呼和浩特 010031; 3 内蒙古旱作农业重点实验室, 呼和浩特 010031; 4 农业部内蒙古耕地保育科学观测实验站, 呼和浩特 011705; 5 农业部武川农业环境科学观测实验站, 呼和浩特 011705)

摘要: 马铃薯是内蒙古阴山北麓的主要农作物之一, 优化马铃薯种植模式, 可以提高马铃薯产量, 遏制土壤肥力退化, 促进农业可持续发展。本研究于 2009—2014 年进行了 6 a 的大田小区定位试验, 研究了马铃薯与苕子或莜麦间作对土地生产力及水分利用效果的影响。结果表明: 马铃薯/苕子和马铃薯/莜麦 2 种间作模式具有较强且程度相当的间作产量优势, 土地当量比分别为 1.59~2.24 和 1.56~2.22。间作并不会显著增加或降低作物的耗水量, 马铃薯、苕子和莜麦于不同种植年的耗水量有差异, 最大降幅分别可达 25.1%、23.7% 和 25.5%。间作可显著提高间作系统的水分利用效率, 具有显著的水分利用优势(水分当量比分别为 1.59~2.01 和 1.55~2.24), 且主要体现在苕子和莜麦作物上。此外, 间作体系的水分利用效果还与当年的降雨量关系密切。综合分析认为, 马铃薯间作有利于整个间作系统农田生产力和水分利用效率的提高, 且对苕子和莜麦的提升效果更佳。

关键词: 旱农区; 马铃薯间作; 农田生产力; 水分利用效率

中图分类号: S152.4 **文献标识码:** A

马铃薯是内蒙古阴山北麓的主要农作物, 但由于长期缺乏有机肥, 马铃薯连作地力退化严重、产量严重下降和连年干旱等一系列问题, 严重制约了马铃薯产业的发展^[1]。合理的种植模式能够充分利用空间, 改进土壤结构, 改善农田生态系统的生产力和水分利用效率^[2]; 充分利用边行优势, 用地与养地相结合; 充分缓解作物争地矛盾和调节茬口, 实现农作物增产增收^[3-5]。有研究表明, 不同品种马铃薯与玉米间套作较单作产量均提高 17% 以上^[6]。马铃薯套玉米间胡萝卜模式的投入产出效果最佳, 其产投比和每亩纯收入最高, 分别为 2.937 和 1 278.79 元^[7]。陈长青等^[8]发现柰李+(花生-绿肥-花生) 对提高土壤肥力的效果最佳。因此, 优化种植模式和合理衔接茬口在作物增产、增收及促进农业生产的可持续发展等方面显得尤为重要。

水分是作物生长发育不可缺少的资源, 也是养分传输的载体。在雨养农业中, 有限的降水常常是产量的制约因素^[9]。马铃薯地的水分生态环境问题突出, 逐渐成为制约旱农区马铃薯可持续发展的主要限制

因素。近些年来, 旱作节水型生态农业一直是武川地区大力推行的技术模式。Mandal 等^[10]研究表明, 当浅根系的小麦与深根系的印度芥末或鹰嘴豆间作时, 耗水量和产量都增加。叶优良等^[11]研究表明小麦与玉米间作相对于单作水分消耗量(WU)减少 4.82%~8.79%。在 300 kg/hm² 氮水平下, 6 个小麦品种与玉米间作较单作耗水量 WU 减少 1.09%~6.96%, WUE 增加 10.76%~29.56%。

目前有关内蒙古阴山北麓地区马铃薯产量形成因素与栽培技术方面已有大量报道^[1,4,12-13], 但因作物品种、年平均降雨量、田间管理和土地质量差异等致使其研究结论不一。因此, 尚缺少统一农作制下长期定位试验研究旱农区马铃薯不同间作模式对土地生产力及水分利用效率的影响。本研究在内蒙古农牧业科学院武川旱作农业实验站进行, 通过 6 a 的定位试验开展马铃薯与苕子及莜麦的间作试验, 以土地当量比(LER)和水分利用当量比(WER)作为评价指标, 量化不同间作模式下的农田耗水量(ET)和水分利用效率(WUR)。通过不同间作模式间土地生产力和水分利

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503120)资助。

* 通讯作者(duanyu63@aliyun.com)

作者简介: 侯建伟(1986—), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为土壤肥力与植物营养。E-mail: hjw19860627@126.com

用状况的差异,分析间作优势的可能机理,并提出适宜当地旱农区的合理种植模式,为提高武川县旱农区土地生产力及水分高效利用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

长期定位试验于 2009—2014 年在内蒙古呼和浩特武川县内蒙古农牧业科学院旱作农业实验站(41°08'22.8"N, 111°17'43.6"E)进行。内蒙古武川县属于北方农牧交错带的中间地带,地处阴山山脉向蒙古高原的过渡区,以种植业和畜牧业为主,地域上农牧交错,经济上农牧兼营。地貌属典型的山地丘陵区,山地面积占全县土地面积的 48%,耕地面积为 11.8 万 hm^2 ,水浇地仅占现有耕地的 9% 左右,绝大部分耕地都是旱作农业。气候属半干旱大陆性气候,年降雨量 200~400 mm,主要集中在 6—8 三个月。无霜期 100 d 左右,大于 10 °C 有效积温 2 000 °C,年平均风速 3 m/s。土壤为栗钙土,砂壤土,土壤肥力中下等,具体为:有机质 7.70 g/kg、碱解氮 26.81 mg/kg、有效磷 14.63 mg/kg、速效钾 60.80 mg/kg 和 pH 8.35。试验地降雨量见图 1。

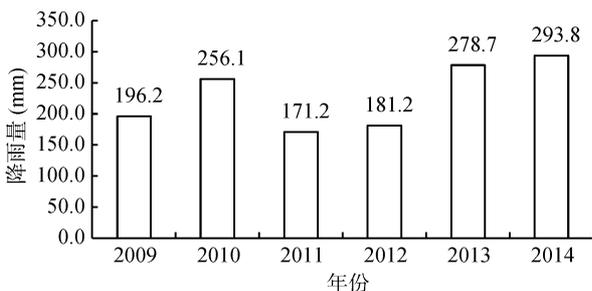


图 1 2009—2014 年试验地降雨量
(内蒙古呼和浩特市武川县)

Fig.1 Rainfalls of experimental field from 2009 to 2014 (Wuchuan, Hohhot, Inner Mongolia)

1.2 试验作物

马铃薯:品种为“克新 1 号”;毛叶苕子:品种为“蒙苕 1 号”;莜麦:品种为“青莜 1 号”。

1.3 试验设计

试验包括 6 个处理,每个处理 3 次重复。分别为:马铃薯连作 I; 马铃薯/苕子间作; 苕子连作; 马铃薯连作 II; 马铃薯/莜麦间作; 莜麦连作。随机区组排列,小区面积 $6 \text{ m} \times 8 \text{ m} = 48 \text{ m}^2$ 。(注:为排除农田地力差异的影响,在两个间作系统中分别设置马铃薯连作处理,以 I 和 II 区分)

种植要求: 单种马铃薯:起垄种植,垄与垄 1 m,垄上种植 2 行,行距 25 cm,株距 50 cm; 单种莜麦:行距 25 cm,种植 24 行; 单种苕子:单

种行距 25 cm,每小区 24 行; 马铃薯/苕子(1 m : 1 m 间作):马铃薯种植(同单种马铃薯),苕子 1 m 种植 4 行; 马铃薯/莜麦(1 m : 1 m 间作):马铃薯种植(同单种马铃薯),莜麦 1 m 种植 4 行; 试验期间各处理都不施肥,其他管理同一般生产田。

1.4 测试项目与方法

产量测定:收获时,每个小区内取中间 4 行进行亩产量和单株产量测定。马铃薯块茎选取代表性小样 3 株,于烘箱内烘至恒重称其干质量。马铃薯的经济产量以块茎鲜质量表示,为避免误差马铃薯的最终经济产量以块茎干质量 $\times 80\%$ 含水量计算得到。苕子和莜麦的经济产量为籽粒产量(含水量为 12% 左右)。间作和单作中作物产量用均一化产量 Y_i 表示:

$$Y_i = PY_i \times HD_i \quad (1)$$

式中: Y_i 为马铃薯(或莜麦或苕子)的均一化产量(g/m^2); PY_i 为马铃薯(或莜麦或苕子)的单株平均产量($\text{g}/\text{株}$)。

$$HD_i = P_i \times RLD_i \quad (2)$$

式中: HD_i 为马铃薯(或莜麦或苕子)间作或单作的均一化种植密度($\text{株}/\text{m}^2$); P_i 为马铃薯(或莜麦或苕子)的株距密度($\text{株}/\text{m}$); RLD_i 为马铃薯(或莜麦或苕子)的行长密度($\text{行}/\text{m}$)。

土地当量比(land equivalent ratio, LER):同一农田中两种或两种以上作物间混作时的收益与各个作物相应单作的收益之比的总和。是衡量间混作比单作增产程度的一项重要科学指标^[11]。其公式为:

$$LER = LER_1 + LER_2 = \frac{Y_{i1}}{Y_{i2}} + \frac{Y_{S1}}{Y_{S2}} \quad (3)$$

式中: LER_1 和 LER_2 分别表示马铃薯、苕子(或莜麦)在间作系统中的相对产量,也称偏土地当量; Y_{i1} 和 Y_{i2} 分别表示马铃薯间作和单作时的产量; Y_{S1} 和 Y_{S2} 分别表示苕子(或莜麦)间作和单作时的产量。LER 表示作物产量间作与单作的比值,当某种间作模式的 $LER < 1$ 时,认为间作体系降低了土地生产力,具有劣势;当 $LER = 1$ 时,则认为该间作体系不具有间作优势;当 $LER > 1$ 时,具有间作优势,有一定的应用价值;当 $LER > 1.2$ 时,通常认为该间作体系具有较强的间作优势,LER 越大产量优势越明显。

土壤水分测定采用烘干法。作物播种前和收获后 0~100 cm 土层多点(每小区 5 点)“S 型”用土钻分层取土(0~5 cm, 5~10 cm, 其余均为 10 cm 一层,共 11 层)。

$$\text{水分利用效率(WUE)}: WUE = \frac{Y}{ET} \quad (4)$$

式中： Y 为作物产量(g/m^2)； ET 为耗水量(mm)。其中耗水量(ET)为：

$$ET = P + S_{ini} - S_{fin} \quad (5)$$

式中： P 为降水量； S_{ini} 为播前土壤根层(0~100 cm)储水量(mm)； S_{fin} 为收获后土壤根层储水量(mm)。储水量(mm)=土层厚度(cm) \times 土壤体积质量($1.45 g/cm^3$) \times 重量含水量($\%$)

水分当量比(WER)：

$$WER = WER_1 + WER_2 = \frac{WUE_{i1}}{WUE_{i2}} + \frac{WUE_{s1}}{WUE_{s2}} \quad (6)$$

式中： WER_1 和 WER_2 分别表示马铃薯、苕子(或苜蓿)在间作系统中的相对水分利用率，即偏水分当量比； WUE_{i1} 和 WUE_{i2} 分别表示马铃薯间作和单作时的水分利用效率； WUE_{s1} 和 WUE_{s2} 分别表示苕子(或苜蓿)间作和单作时的水分利用效率。 WER 表示作物间作与单作水分利用率的比值，当某种间作模式的 $WER < 1$ 时，认为间作体系降低了水分利用率，具有

劣势；当 $WER = 1$ 时，则认为该间作体系不具有间作优势；当 $WER > 1$ 时，具有间作优势，在水分高效利用方面有一定的应用价值。

1.5 数据处理

利用 SAS 9.0 进行方差分析(ANOVA)，Excel 2007 绘制表格。

2 结果与分析

2.1 不同间作模式下的作物产量

由 2009—2014 年的产量数据(表 1)可知，3 种植模式对马铃薯的产量(经济产量)影响差异很大。2009—2014 年，无论是马铃薯/苕子间作还是马铃薯/苜蓿间作马铃薯的产量均显著低于单作马铃薯，特别是马铃薯/苜蓿间作马铃薯的产量更低。通过表 2 还可看出，不同种植模式对苕子和苜蓿的产量也产生了显著的影响，2 种间作模式均显著提高了苕子和苜蓿的籽实产量。

表 1 马铃薯和苕子、苜蓿不同种植模式下的经济产量和土地当量比

Table 1 Economic yields and land equivalent ratios under different planting patterns of potato, vetch and naked oat

年份	种植模式	经济产量(kg/hm^2)				土地当量比					
		马铃薯	苕子	马铃薯	苜蓿	LER _{P1}	LER _V	LER _{P2}	LER _O	LER ₁	LER ₂
2009	间作	3 370.5	1 130.0	3 288.0	2 029.5	0.78	1.07	0.82	1.11	1.85	1.93
	单作	4 336.5	1 051.5	4 015.5	1 821.0	-	-	-	-	-	-
2010	间作	3 289.5	1 080.0	4 213.5	2 500.5	0.73	1.10	1.01	1.21	1.83	2.22
	单作	4 500.0	979.5	4 179.0	2 061.0	-	-	-	-	-	-
2011	间作	4 251.0	1 186.5	4 380.0	2 236.5	0.92	1.32	0.76	1.13	2.24	1.81
	单作	4 608.0	900.0	5 787.0	1 983.0	-	-	-	-	-	-
2012	间作	4 669.5	508.5	4 348.5	2 635.5	0.75	0.84	0.74	1.08	1.59	1.82
	单作	6 235.5	603.0	5 911.5	2 430.0	-	-	-	-	-	-
2013	间作	7 183.5	585.0	6 832.5	1 674.0	0.62	1.20	0.61	0.95	1.82	1.56
	单作	11 584.5	486.0	11 278.5	1 755.0	-	-	-	-	-	-
2014	间作	6 972.0	873.0	6 651.0	2 005.5	0.74	1.29	0.88	1.26	2.03	2.14
	单作	9 417.0	678.0	7 594.5	1 587.0	-	-	-	-	-	-

注：经济产量指马铃薯块以及苕子和苜蓿的籽实。LER_{P1}和 LER_V分别代表马铃薯与苕子间作系统中马铃薯、苕子的相对产量；LER_{P2}和 LER_O分别代表马铃薯与苜蓿间作系统中马铃薯、苜蓿的相对产量；LER₁和 LER₂分别代表马铃薯、苕子在间作系统的土地当量比和马铃薯、苜蓿间作系统的土地当量比。

2009—2014 年 3 种作物两种间作模式 6 a 的产量数据(除 2010 年马铃薯/苜蓿间作外)均表明，间作马铃薯的产量均最低，马铃薯/苕子间作、马铃薯/苜蓿间作马铃薯的产量分别相当于单作马铃薯的 62%~92% 和 61%~101%，即两种间作模式中马铃薯的偏土地当量(除 2010 年马铃薯/苜蓿间作外)均小于 1，表明马铃薯在这两种间作模式中处于劣

势，而马铃薯/苕子间作、马铃薯/苜蓿间作对苕子和苜蓿的产量影响较大，除个别年限外，苕子和苜蓿的偏土地当量均大于 1，说明间作对苕子和苜蓿具有明显的产量优势。

就整个间作系统而言，苜蓿作物间作产量优势最大，但对马铃薯的产量影响也相对大些。此外，由表 2 中 6 a 的数据还可看出，马铃薯/苕子间作、马铃薯

/苜蓿间作模式系统的LER(LER₁和LER₂分别为1.59~2.24和1.56~2.22)均大于1.2。说明这2种间作体系均具有较强的间作产量优势且2种间作体系的产量优势相当。

2.2 不同间作模式下的水分利用效果

2.2.1 间作模式对农田耗水量的影响

2009—2014年的耗水量数据显示(表2),耗水量基本表现为:马铃薯>

苜蓿>苕子,且差异达显著水平($P<0.05$)。马铃薯/苕子间作及马铃薯/苜蓿间作没有显著改变马铃薯的耗水量,马铃薯、苕子和苜蓿3种作物间作与单作间的农田耗水量也没有显著差异。马铃薯、苕子和苜蓿的耗水量变化范围分别为255.2~340.5 mm、206.8~271.0 mm和205.2~275.4 mm。说明马铃薯/苕子间作及马铃薯/苜蓿间作并不会显著增加或降低作物的耗水量。

表2 马铃薯/苕子和马铃薯/苜蓿间作的农田耗水量
Table 2 Water consumption under potato intercropped with vetch or naked oat

年份	种植模式	耗水量(mm)			
		马铃薯	苕子	马铃薯	苜蓿
2009	间作	327.1 Aa	243.7 Ac	330.9 Aa	269.3 Ab
	单作	318.6 Aa	246.2 Ac	333.7 Aa	255.8 Ab
	SE	20.4	17.3	27.1	17.0
2010	间作	320.3 Aa	238.2 Ac	317.6 Aa	257.6 Ab
	单作	326.1 Aa	233.6 Ac	315.3 Aa	263.1 Ab
	SE	22.9	19.5	30.2	18.3
2011	间作	303.8 Aa	215.1 Ab	261.1 Aa	213.5 Ac
	单作	318.5 Aa	220.0 Ac	255.2 Aa	228.3 Ab
	SE	27.4	15.7	18.2	22.1
2012	间作	317.9 Aa	206.8 Ab	285.2 Aa	205.2 Ac
	单作	310.2 Aa	210.1 Ab	278.9 Aa	218.9 Ac
	SE	19.8	11.6	26.3	20.0
2013	间作	337.2 Aa	250.5 Ab	329.7 Aa	268.4 Ac
	单作	341.7 Aa	246.8 Ab	322.5 Aa	270.0 Ac
	SE	30.6	17.2	28.4	13.9
2014	间作	340.5 Aa	271.0 Ac	344.0 Aa	275.4 Ab
	单作	336.4 Aa	268.4 Ab	347.8 Aa	272.2 Ac
	SE	34.1	15.4	30.2	11.7
平均	间作	324.5	238.4	311.4	248.2
	单作	325.4	237.5	308.9	251.4
	SE	23.7	18.2	20.5	13.6

注:表中大写字母不同表示同一年份同种作物间作与单作间的差异达到 $P<0.05$ 显著水平;小写字母不同表示同一年份间作或单作体系下不同作物间的差异达到 $P<0.05$ 显著水平;SE表示各个处理间的平均标准误差,下同。

由表2还可看出,2009—2014年马铃薯、苕子和苜蓿3种作物间作和单作6a的耗水量数据有所差别,尤其是2011年和2012年耗水量降幅相对较大,最大降幅分别为25.1%、23.7%和25.5%,这可能与这两年的降雨较少有关。

2.2.2 间作模式对水分利用效率的影响

2009—2014年的水分利用效率的数据显示(表3),马铃薯间作的水分利用率均低于单作,苕子和苜蓿的间作与单作间则没有一定的规律性变化。从6a的水分利用效率均值来看,间作显著降低了马铃薯的水分利用效率

而显著提高了苜蓿的水分利用效率($P<0.05$),分别降低和升高了24.3%~26.2%、13.3%。

多重均值检验结果表明,马铃薯间作与单作的水分利用效率除2009、2010和2011年未达显著差异水平外,其他各种种植年均达显著差异水平($P<0.05$)。苕子和苜蓿分别在2011年和2010年、2011年达显著差异水平,其他各种种植年均未达显著差异水平。说明马铃薯/苕子和马铃薯/苜蓿2种间作模式会显著影响马铃薯的水分利用率,而对苕子和苜蓿只在个别年限有显著影响。同一年中,马铃薯/苕子、马铃薯/苜蓿

表 3 马铃薯/苕子和马铃薯/莠麦间作作物水分利用效率和水分当量比
Table 3 Water use efficiencies and water equivalent ratios under potato intercropped with vetch or oats

年份	种植模式	水分利用效率(g/(m ² ·mm))				水分当量比					
		马铃薯	苕子	马铃薯	莠麦	WER _{P1}	WER _V	WER _{P2}	WER _O	WER ₁	WER ₂
2009	间作	1.03 Aa	0.46 Ab	0.99 Bb	0.75 Aa	0.76 b	1.09 a	0.83 a	1.06 a	1.84 a	1.88 a
	单作	1.36 Aa	0.43 Ab	1.20 Ab	0.71 Aa	—	—	—	—	—	—
2010	间作	1.03 Aa	0.45 Ab	1.33 Aa	0.97 Aa	0.74 b	1.08 b	1.00 a	1.24 a	1.83 b	2.24 a
	单作	1.38 Aa	0.42 Ab	1.33 Aa	0.78 Ba	—	—	—	—	—	—
2011	间作	1.40 Ab	0.55 Ab	1.68 Ba	1.05 Aa	0.97 a	0.75 a	0.74 b	0.81 a	1.82 a	1.55 b
	单作	1.45 Ab	0.41 Bb	2.27 Aa	0.87 Ba	—	—	—	—	—	—
2012	间作	1.47 Ba	0.25 Ab	1.52 Ba	1.28 Aa	0.73 a	0.86 b	0.72 a	0.88 a	1.59 b	1.60 a
	单作	2.01 Aa	0.29 Ab	2.12 Aa	1.11 Aa	—	—	—	—	—	—
2013	间作	2.13 Ba	0.23 Ab	2.07 Ba	0.62 Aa	0.63 a	1.19 a	0.59 a	0.96 b	1.81 a	1.55 b
	单作	3.39 Aa	0.20 Ab	3.50 Aa	0.65 Aa	—	—	—	—	—	—
2014	间作	2.05 Ba	0.32 Ab	1.93 Ba	0.73 Aa	0.73 b	1.28 a	0.89 a	1.25 a	2.01 a	2.13 a
	单作	2.80 Aa	0.25 Ab	2.18 Aa	0.58 Aa	—	—	—	—	—	—
平均	间作	1.52 Ba	0.38 Ab	1.59 Ba	0.90 Aa	0.76 a	1.14 a	0.79 a	1.14 a	1.81 a	1.83 a
	单作	2.06 Aa	0.33 Ab	2.10 Aa	0.78 Ba	—	—	—	—	—	—

注：WER_{P1}和 WER_V分别代表马铃薯与苕子间作系统中马铃薯、苕子的相对水分利用效率；WER_{P2}和 WER_O分别代表马铃薯与莠麦间作系统中马铃薯、莠麦的相对水分利用效率；WER₁和 WER₂分别代表马铃薯、苕子在间作系统的水分当量比和马铃薯、莠麦间作系统的水分当量比。

2 种植体系间，马铃薯只在 2009 年和 2011 年达到了显著差异水平；而苕子和莠麦在 2009—2014 年均达显著差异水平，且莠麦的水分利用效率高于苕子。马铃薯/苕子、马铃薯/莠麦 2 种间作体系中，2009—2014 年的数据表明，苕子或莠麦对马铃薯水分利用效率的影响没有一定的规律性，不同年限间具有波动性。

通过对系统的水分当量比进行分析，可判定不同间作模式下间作系统是否具有提高水分利用效率的能力。由表 3 可知，2009—2014 年马铃薯/苕子、马铃薯/莠麦 2 种间作体系的 WER 分别为 1.59 ~ 2.01 和 1.55 ~ 2.24，说明间作模式具有很大的水分利用优势，但受年际间气候变化的影响较大，在降雨较少的 2011 年和 2012 年，由于马铃薯对苕子及莠麦的水分竞争加大，导致体系中的优势作物苕子和莠麦的 WER 大幅度降低，分别最大降低了 41.4% 和 29.6%。此外，2009—2014 年 2 种间作体系的 WER 大小相当且均大于 1，说明间作模式可以显著提高系统的水分利用效率，具有显著的水分利用优势。

3 讨论

3.1 不同间作模式下的作物产量及土地生产力

马铃薯/苕子和马铃薯/莠麦 2 种间作模式中马铃薯产量均低于单作马铃薯，即马铃薯的偏土地当量比为 0.77 左右，苕子和莠麦的偏土地当量比为 1.12 左右，2 种体系的 LER 均大于 1.91，说明间作体系降低了马铃薯产量而增加了整个间作体系产量且苕子

或莠麦在间作体系中具有绝对优势。与董宛麟等^[14]的马铃薯/向日葵间作的研究有一定相似性，此外，大豆/玉米间作^[15]、核桃树/小麦间作^[15]均显示通过高遮蔽、负边行效应等降低了矮秆作物的产量。本研究中间作马铃薯产量降低，一方面可能是因为带宽配置较窄，1 m 的带宽只能种植 2 垄马铃薯，虽然莠麦或苕子株高不及向日葵等其他高秆作物，但仍有一定的负边行效应；另一方面该试验区多暴雨、干旱多风且风力强劲，每年 7 月中旬左右苕子出现大面积的倒伏现象，对间作马铃薯遮掩严重。因此，在马铃薯间作模式中，种植株高相当的抗倒伏作物并适当增加带宽可能更适宜该地区的马铃薯种植，增加土地生产力。马子林^[16]在马铃薯间作蚕豆的边行效应及增产机理研究中发现，蚕豆边行越靠近马铃薯，地温度越高，土壤水肥条件越好，蚕豆单株产量也越高。蚕豆与马铃薯不同间作模式中，6 行蚕豆+2 垄马铃薯不具间作优势，而以 8 行蚕豆+3 垄马铃薯间作模式的总产量和纯收入最高。

间作体系中单纯比较作物产量，不能全面评价土地生产力的优劣，只能说明各作物产量是否具有间作优势。因此，通常以土地当量比 LER 来整体评价间作系统。本研究中 2 种间作模式(马铃薯/苕子、马铃薯/莠麦)的 LER 均为 1.9 左右(大于 1.2)，均具有较强且优势相当的间作产量优势。可能是因为苕子和莠麦在生长条件、水、肥、气、热等因素具有一定的相似性。两种间作系统中，马铃薯产量占单作产量的

80% 以下, 而苕子和莜麦均高于单作产量。因此, 在间作模式中适当增加苕子或莜麦的间作比例, 可能会进一步提高间作体系的土地生产力。

3.2 不同间作模式下的水分利用状况

2009—2014 年马铃薯/苕子和马铃薯/莜麦间作均没有显著改变作物的耗水量。间作马铃薯的水分利用效率低于单作, 间作苕子和间作莜麦的水分利用效率高于单作。与一些研究结果类似^[11,14]。这可能与间作马铃薯的产量较低而苕子和莜麦的产量较高有关。单纯比较间作作物的水分利用效率不能在农田水平上全面评价间作系统水分利用效率的优劣。因此, 本研究通过对水分当量比(WER)的分析来评价 2 种间作模式是否具有提高水分利用效率的能力。马铃薯/苕子和马铃薯/莜麦 2 种间作模式的 WER 均大于 1(分别为 1.59~2.01 和 1.55~2.24), 其平均值分别为 1.81 和 1.83, 未达显著差异水平。说明 2 种间作体系均提高了整个系统的水分利用效率且优势相当。这可能主要与苕子和莜麦的根系入土深度及需水量相当, 对整个间作体系的水分竞争相近有关。有研究建议, 建立间作体系要充分考虑到作物的根系深度差异和养分吸收的生态位差异。一些研究发现^[10,15], 当浅根系的小麦与深根系的鹰嘴豆间作、小麦与玉米间作时, 由于更有效地利用了深根区的土壤水分及两种作物对养分的吸收在时间上是分离的, 间作体系充分应用了当地的光、热和土地资源, 作物的耗水量和产量都显著增加。在本研究中, 已考虑了间作作物的根系深度和养分需求量差异, 至于是否具有养分吸收的生态位差异和不同间作带宽对农田生产力和水分利用的影响还需进一步研究。

4 结论

1) 马铃薯与苕子或莜麦间作均能够显著提高整个间作体系的总产量且 2 种间作模式的间作产量优势相当。但是间作不利于马铃薯单产的提高, 而有利于苕子和莜麦产量的提高, 莜麦作物表现地最为突出。

2) 马铃薯与苕子或莜麦间作并不会显著改变作物的耗水量。间作能够显著提高整个间作体系的水分利用效率, 间作马铃薯不具有水分利用优势, 但是极

大地提高了莜麦的水分利用效率。

参考文献:

- [1] 赵沛义, 妥德宝, 段玉, 等. 内蒙古后山旱农区马铃薯适宜播种密度和播期研究[J]. 华北农学报, 2005, 20(Z1): 10-14
- [2] 王贵平, 马日亮, 关艳波, 等. 地膜覆盖对旱作马铃薯光合性能及干物质累积的研究[J]. 华北农学报, 2001, 16(Z1): 119-122
- [3] 黄英兰, 邓晨, 莫永. 蔬菜轮作、间套作和合理密植在生产上的应用[J]. 农技服务, 2008, 25(4): 21-25
- [4] 段玉, 曹卫东, 妥德宝. 内蒙古阴山北麓马铃薯与绿肥作物轮作研究[J]. 内蒙古农业科技, 2010, 10(2): 26-28
- [5] 周开芳, 张书华, 陈敏, 等. 旱耕地不同间、套种植模式对土壤肥力和作物周年产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2003, 31(Z1): 28-30
- [6] 李佩华. 川西南山区马铃薯+玉米高产高效种植模式研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(6): 2247-2252
- [7] 韩峰, 吴康, 高雪, 等. 马铃薯不同种植模式与施肥的生长差异[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(9): 90-94
- [8] 陈长青, 何园球, 卞新民, 等. 基于特征向量的旱地连续种植模式土壤肥力综合评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 620-624
- [9] 高阳, 段爱旺, 刘浩, 等. 间作条件下水分在作物间的分配与利用研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 281-285
- [10] Mandal B K, Dasgupta S, Ray PK. Yield of wheat, mustard and chickpea grown as sole crop and intercrop with 4 moisture regimes[J]. Indian Journal of Agriculture and Sciences, 1986, 56(3): 187-193
- [11] 叶优良, 李隆, 孙建好. 小麦/玉米间作和氮肥对水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 176-182
- [12] 江俊燕, 汪有科. 不同灌水量和灌水周期对滴灌马铃薯生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(2): 121-125
- [13] 周娜娜, 张学军, 秦亚兵, 等. 不同滴灌量和施氮量对马铃薯产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2004, 4(6): 11-12, 16
- [14] 董宛麟, 张立祯, 于洋, 等. 向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 127-133
- [15] 李隆. 间作作物间促进与竞争使用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 1999
- [16] 马子林. 马铃薯间作蚕豆的边行效应及增产机理[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(10): 2254-2256, 2272

Productivities and Water Use Efficiencies of Different Intercropping Systems of Potato in Arid Agricultural Area in North Foot of Yin Mountain

HOU Jianwei¹, DUAN Yu^{2,3,4,5*}, ZHANG Jun^{2,3,4,5}, ZHAO Peiyi^{2,3,4}, JING Yupeng^{2,3,4,5}

(1 *Wujiang College, Tongren University, Tongren, Guizhou 554300, China*; 2 *Institute of Resources and Environment and Detection Technology, Inner Mongolia Academy of Agriculture & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China*; 3 *Inner Mongolia Key Laboratory of Dryland Farming, Hohhot 010031, China*; 4 *Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Inner Mongolia), Hohhot 011705, China*; 5 *Wuchuan Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Hohhot 011705, China*)

Abstract: Potato is one of the main crops in the north foot of Yin Mountains in the Inner Mongolia. Optimizing the planting systems of potato can increase the yield of potato, prevent the degradation of soil fertility, and promote the sustainable development of agriculture. A long-term field plot experiment was conducted from 2009 to 2014 to study the effects of intercropping potato with vetch or with naked oat on the land productivities and water use efficiencies. The results showed that: the yield-increasing effects were strong and similar between the intercropping potato with vetch or with naked oat, Land equivalent ratios (LER) were 1.59–2.24 and 1.56–2.22, respectively. Water consumption increased or reduced insignificantly between different intercropping system, but there were significant differences in water consumption between different experimental years, the maximal reduction in water consumption were 25.1%, 23.7% and 25.5%, respectively. Intercropping system had obvious advantage in water use, they significantly improved the water use efficiency, (water equivalent ratios were 1.59–2.01 and 1.55–2.24, respectively), particularly for vetch and naked oat. In addition, the water use effect of intercropping system was closely related to the rainfall. In general, potato intercropping mode is beneficial to improve field productivity and water use efficiency, particularly for vetch and naked oat.

Key words: Arid agricultural area; Potato intercropping; Field productivity; Water use efficiency