

北疆地区一年两作种植模式 效果及适宜性分析

侯裕生^{1,2}, 张金珠^{1,2}, 王振华^{1,2}, 李文昊^{1,2}, 温越^{1,2}

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘 要:通过 2 a 重复对比试验,设置了 4 种不同种植模式春小麦—复播油菜、春小麦—复播青贮玉米、单作棉花和单作春播玉米(分别记为模式 1、模式 2、模式 3 和模式 4),对各模式下资源环境利用率、水肥资源消耗利用及经济效益进行研究。结果表明:一年两作种植模式是适合北疆地区发展的一种优化高效种植模式,北疆生态区内有效积温大于 4 260℃就可推行该种植模式,其中石河子地区≥0℃活动积温达到了 4 300℃~4 500℃,可以满足麦后复播需求。相对于单作种植模式,一年两作种植模式在干物质生产效率及分配、周年能量生产方面具有明显优势,其中模式 1 周年干物质生产效率比模式 3、模式 4 分别提高了 111.04%和 29.53%,模式 2 的周年干物质生产效率比模式 3、模式 4 分别提高了 123.56%和 37.21%;模式 1 周年能量生产分别比模式 3、模式 4 提高了 102.68%和 28.02%,模式 2 周年能量生产分别比模式 3、模式 4 提高了 114.10%和 35.24%,其中模式 2 种植模式年总辐射利用率、总辐射生产效率、有效积温分配率及温度生产效率均达到最大值,其生育期达 179~184 d,为 4 种植模式中跨越时间最长的模式,且包含了光热资源最为丰富的 5—9 月,使光热资源得到了更加高效的利用。在水肥资源利用消耗与经济效益方面,由于棉花较好的市场价值以及单作春播玉米的高效生产能力,使得一年两作模式在水肥资源利用与经济效益方面优势不明显。

关键词:种植模式;一年两作;资源利用效率;经济效益;北疆生态区

中图分类号:S344 **文献标志码:**A

Analysis of the effect and suitability of bi-annual planting model in Northern Xinjiang

HOU Yusheng^{1,2}, ZHANG Jinzhu^{1,2}, WANG Zhenhua^{1,2}, LI Wenhao^{1,2}, WEN Yue^{1,2}

(1.College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: In order to study the effect and suitability of bi-annual planting patterns in Northern Xinjiang ecological region, an optimized planting mode of efficient planting system was considered to enrich the planting model in the ecological zone and realize the diversification of planting model. In this paper, two years of repeated comparative experiments were carried out, and four different planting models were set up as spring wheat-repeating oil sunflower, spring wheat-complex silage corn, single crop cotton, and single crop spring sowing maize (designated as model 1, model 2, model 3, and model 4, respectively) to conduct a plot experiment. The resource and environmental utilization rate, water and fertilizer resources consumption and utilization, and economic benefits were studied under the four different planting models. The results showed that bi-annual planting model was an optimized planting mode of efficient planting model in the development of the northern Xinjiang ecological zone. Areas with effective accumulated temperature greater than 4260 ℃ promoted the planting model, esp. Shihezi region 0℃ or

higher active accumulated temperature reached 4 300℃~4 500℃, then, sowing wheat to meet demand. Compared with the single planting model, bi-annual planting model had obvious advantages in dry matter production efficiency and distribution, and annual energy production. The dry matter production efficiency of model 1 was 111.04% and 29.53% higher than that of model 3 and model 4, respectively. Compared with model 3 and model 4, the dry matter production efficiency of model 2 increased by 123.56% and 37.21%, respectively. The annual energy production of model 1 was 102.68% and 28.02% higher than that of model 3 and model 4, respectively, and the annual energy production of model 2 was 114.10% and 35.24% higher than that of model 3 and model 4, respectively. The annual total radiation utilization rate, total radiation production efficiency, effective accumulated temperature distribution rate, and temperature production efficiency of model 2 all reached the maximum value, because the growth period of the model was 179~184 days, which was the longest among 4 models. The planting pattern spanned the longest time and contained the most abundant solar and thermal resources from May to September, which makes the utilization of solar and thermal resources more efficient. Because of the better market value of cotton and the efficient production capacity of spring-sown maize, advantages of the two bi-annual cropping systems in water and fertilizer resources utilization and economic benefits were not obvious.

Keywords: cropping pattern; bi-annual planting; resource utilization efficiency; economic benefit; Northern Xinjiang ecological zone

种植制度是指某个地区或生产单位农作物的组成、配置、熟制与种植模式(单作间混套作、轮作与连作)所组成的整套相互联系并与当地生产条件、养殖业生产与农业资源相适应的技术体系^[1]。随着种植技术的提高和农业生产水平发展,种植制度会产生阶段性变化^[2]。同时,有研究表明气候变化对种植制度存在影响^[3-7]。气候变暖作为一个全球性问题,在 IPCC 第四次评估报告中显示,大气温度普遍提高,其中北半球高纬度地区提高最为明显^[8-10]。随着新疆北部温度的升高、积温的增加以及农业生产的发展,该地区种植结构也在不断调整^[11-12]。其中非传统麦田套种玉米耕作模式在 20 世纪 90 年代在北疆沿天山以北地区初步实施^[13],进入 21 世纪,受北疆地区大面积推广机械化作业以及全球气候变暖的影响,北疆地区开始探索一年两作种植模式^[14]。

一年两作种植模式作为一种优化的高效种植模式,具有资源利用率高、光温生产效率高等优点^[15]。国内外学者对一年两作种植模式下资源利用率的研究取得了一些成果,其中王美云等^[16]针对华北平原地区开展双季青贮玉米模式物质生产及资源利用效率研究,研究表明双季青贮玉米种植模式不仅可充分利用该地区的自然资源,而且为该地区提供了一种优化的高效种植模式;李立娟等^[17]针对黄淮海地区开展双季玉米产量性能与资源效率利用研究,研究结果表明,该种植模式具有光温生

产效率高、经济效益好等优点,是该地区长期冬小麦—夏玉米模式的补充;张占琴等^[14]针对北疆地区开展冬小麦—复播青贮玉米种植模式物质生产及资源利用率研究,研究结果表明,一年两作是一种资源高效利用的种植模式。

长期以来,虽然开展了一些一年两作相关研究,但经调查发现,在北疆地区该种植模式推广率较低。棉花单季种植依然占据主导地位,一年两作占比较小^[18]。通过对北疆地区现有主要种植作物调查分析,选定棉花、春播玉米单作种植模式作为对照;在选定一年两作种植模式时,以地区“发展小麦生产,扩大复种、套种面积,提高小麦综合种植效益”农业结构战略调整为导向兼顾考虑春小麦生长周期及复播要求等因素,选定春小麦为春播作物;在复播作物选取中,主要考虑复播作物复播指数及其效益,其中复播青贮玉米营养丰富,产量较高,是发展畜牧业的优质粗饲料,在新疆畜牧业发展中占有重要地位,具有广阔发展前景;油葵作为世界广泛种植的四大油料作物之一,在新疆油料作物种植面积中占有相当大比重,是新疆最主要的油料作物,因此两种复播作物对新疆都具有重要意义。本文通过 2 a 重复对比试验,在前人研究基础上针对北疆开展一年两作种植模式研究,通过与现行单作棉花、单作春播玉米两种种植模式对比分析,在考虑资源环境利用率、水肥资源消耗利用及经济效益因素下,探明一年两作种植模式在该地区的适宜性

与优越性,为该地区未来根据生产需求调节作物生产提供一种优化的高效种植模式,同时也为生态区内实行种植模式的多元化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2011 年和 2012 年在石河子大学节水灌溉试验站进行。试验站位于石河子市西郊石河子大学农试场二连,85°59′47″E,44°19′28″N,海拔 412 m,平均地面坡度为 5.6‰,属典型温带大陆性气候,年均日照时间为 2 865 h,多年平均降雨量为 207 mm,平均蒸发量为 1 660 mm,≥0℃的活动积温为 4 500℃,无霜期为 170 d。年平均风速为 1.5 m·s⁻¹,静风占 32%,偏东风占 14%,偏南风占 22%,偏西风 17%,偏北风占 15%。地下水埋深 5 m 以下。

1.2 试验设计

本试验设置了 4 种不同种植模式,包含 2 种一年两作种植模式,2 种单作种植模式(CK1、CK2),每种种植模式设置 3 次重复,共计 12 个小区,每个试验小区规格为长 18.6 m,宽 4.5 m,小区面积为 83.7 m²,每种种植模式之间设有 5 m 间隙且各处理重复之间设有保护行。4 种植模式分别为:

模式 1:一年两作春小麦—复播油葵,其中种植春小麦品种为“新春 6 号”,复播油葵品种为“新葵杂五号”;

模式 2:一年两作春小麦—复播青贮玉米,其中种植春小麦品种为“新春 6 号”,复播青贮玉米品种为“瑞玉 F98”;

模式 3(CK1):单作棉花,种植品种为“农丰 133”;

模式 4(CK2):单作春播青贮玉米,种植品种为“新饲玉 10 号”。

春小麦采用 15 cm 等行距种植模式,滴灌带铺设为一管四行,滴灌带间距 60 cm,滴头间距 30 cm;复播青贮玉米及单作春播玉米采用宽窄行(80+40)种植模式,株距 20 cm,滴灌带铺设为一管两行,滴头间距 30 cm;复播油葵采用株距 25 cm,行距 60 cm 种植模式,滴灌带铺设为一管一行,滴灌带间距 60 cm,滴头间距 30 cm。所有小区处理采用同一供水系统,滴灌供水系统压力控制在 0.06~0.10 MPa,各小区处理由单独球阀控制灌水,由单独施肥罐控制施肥,可保证每个小区处理精确控制灌水量和施肥量。

4 种植模式下各作物灌溉定额、施肥量结合

前人研究^[19-23]及当地生产实践活动确定。4 种植模式各作物生育期内具体灌水、施肥量详见表 1。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植物生态系统资源 使用站内气象站及 SPAC 植物生理生态系统采样(设置每小时 1 次),采集的数据自动存储到模块内,两种仪器测得的数据在进行数据处理时可补充验证。根据仪器记录的总辐射、有效积温等相关数据,计算出相关效率值。其中 2011 年和 2012 年有效积温和太阳总辐射分配相关数据详见表 2。

1.3.2 植物物质生产量 春小麦:在春小麦成熟时收获,各小区选取 10 株植株,采集植物地上部分,其中包含茎秆、叶片及麦穗,分器官称鲜重,105℃杀青 0.5 h,再于 75℃烘干至恒重,测定干物质重量。

复播青贮玉米及单作春播玉米:均在乳熟期收获,各小区选取 10 株植株,采集植物地上部分,其中包含茎秆、叶片及果穗,分器官称鲜重,105℃杀青 0.5 h,再于 75℃烘干至恒重,测定干物质重量(g)。

复播油葵:在春油葵成熟时收获,各小区选取 10 株植株,采集植物地上部分,其中包含茎秆、叶片及花盘,分器官称鲜重,105℃进行杀青 0.5 h 后,于 75℃烘干至恒重,测定干物质重量。

棉花:在棉花收获时,各小区选取 10 株植株,采集植物地上部分,其中包含茎秆、叶片及花铃,分器官称鲜重,105℃杀青 0.5 h 后于 75℃烘干至恒重,测定干物质重量。

1.3.3 水肥资源利用率 灌溉水利用效率计算公式^[24]:

$$iWUE = Y/I$$

肥料偏生产力计算公式^[25]:

$$PFP = Y/F$$

式中, $iWUE$ 为灌溉水利用率(kg·m⁻³); PFP 为肥料偏生产力(kg·kg⁻¹); Y 为作物产量(kg·hm⁻²); I 为灌水量(m³·hm⁻²); F 为施肥量(kg·hm⁻²)。

1.3.4 净收益

$$S = G - M$$

式中, S 为净收益(元·hm⁻²); G 为经济收入(元·hm⁻²);产量×作物收购单价; M 为总成本(元·hm⁻²),包含水肥投入、用工投入等相关成本投入^[26]。经调查分析,2011、2012 年北疆地区春小麦收购价格为 2.04 元·kg⁻¹,青贮玉米收购价格为 0.245 元·kg⁻¹,油葵收购价格为 4.0 元·kg⁻¹,棉花收购价格为 8.0 元·kg⁻¹。

表 1 不同种植模式下灌水及施肥处理

Table 1 Irrigation and fertilization treatment under different planting models

种植模式 Planting model	年度 Year	灌溉定额 Irrigation quota/mm		施肥量 Fertilization amount/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)+(KH_2PO_4)		生长周期 Growth cycle/d		
		第一季	第二季	第一季	第二季	第一季	第二季	合计
		First crop	Second crop	First crop	Second crop	First crop	Second crop	Total
模式 1	2011	465	300	600+195	500+165	98	93	191
Model 1	2012	465	300	600+195	500+165	96	87	183
模式 2	2011	465	325	600+195	525+165	98	86	184
Model 2	2012	465	325	600+195	525+165	96	83	179
模式 3	2011	450		500+300		166		166
Model 3	2012	450		500+300		157		157
模式 4	2011	400		525+165		138		138
Model 4	2012	400		525+165		139		139

表 2 2011—2012 年有效积温和太阳辐射分配情况

Table 2 Distribution of effective accumulated temperature and solar radiation in 2011–2012

种植模式 Planting model	年度 Year	太阳总辐射分配 Total solar radiation distribution/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)			有效积温 Effective accumulated temperature/ $^{\circ}\text{C}$		
		第一季	第二季	周年	第一季	第二季	周年
		First crop	Second crop	Anniversary	First crop	Second crop	Anniversary
模式 1 Model 1	2011	2150.61	1824.92	3975.53	1855.00	2365.00	4220.00
	2012	2099.61	1774.32	3873.93	1889.00	2412.00	4301.00
	平均 Average	2125.11	1799.62	3924.73a	1872.00	2388.50	4260.50a
模式 2 Model 2	2011	2150.61	1731.45	3882.06	1855.00	2278.00	4133.00
	2012	2099.61	1686.43	3786.04	1889.00	2324.00	4213.00
	平均 Average	2125.11	1708.94	3834.05a	1872.00	2301.00	4173.00a
模式 3 Model 3	2011	3505.12		3505.12	4020.00		4020.00
	2012	3418.30		3418.30	4115.00		4115.00
	平均 Average	3461.71		3461.71b	4067.50		4067.50a
模式 4 Model 4	2011	3050.58		3050.58	3411.00		3411.00
	2012	2979.73		2979.73	3479.00		3479.00
	平均 Average	3015.16		3015.16c	3445.00		3445.00b

注:不同小写字母表示不同处理均值在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

Note; Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$). The same below.

1.4 作物物质、能量生产与生态系统因素资源效率分析

1.4.1 物质生产与干物质产能 物质生产效率以单位面积干物质的产量表示^[16]。

物质生产效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)= 小区收获鲜重(kg) $\times$ (1-植株含水量(%))/小区面积(hm^2)

干物质产量转换为能量以干重热值(燃烧值)来表示^[27]。本试验玉米干重热值为 $1.807 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 春小麦干重热值为 $1.747 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 棉花干重热值为 $1.860 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 油菜干重热值为 $1.819 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[28]。

干物质产能($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)= 干物质产量(g)/面积 $\times$ 干重热值

1.4.2 光能生产效率和年总辐射利用率 光能生产效率以生育期间平均单位热量生产的干物质重量表示^[29]。

光能生产效率($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)= 干物质产量/作物生育期内单位面积的太阳辐射

年总辐射利用率(%)= 干物质产能/单位面积的全年太阳辐射^[30]

1.4.3 温度生产效率 温度生产效率是指生育期内有效积温生产的干物质重量。在积温计算过程中,春小麦下限温度取值为 0°C , 玉米、油菜及棉花下限温度取值为 10°C ^[15]。

温度生产效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)= 单位面积干物质生产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)/生育期间有效积温($^{\circ}\text{C}$)

年有效积温利用率(%)= 作物生育期间有效积温/全年有效积温

1.5 数据处理 数据使用 Microsoft Excel 2016 进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式下作物生育进程比较 4 种不同种植模式对全年时间利用情况见表 3。模式 1 全生育期 183~191 d; 模式 2 全生育期 179~

184 d;模式 3 全生育期 157~166 d;模式 4 全生育期 138~139 d。其中复播青贮玉米比单作春播玉米全生育期缩短约 53~55 d,模式 1 和模式 2 日积温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 天数分别为 173~176 d 和 178~180 d,模式 1 比模式 3、模式 4 分别多 20~23 d 和 24~28 d,模式 2 比模式 3、模式 4 分别多 35~37 d 和 40~41 d。

2.2 不同种植模式下周年干物质生产效率、能量及其季节分配比较

2.2.1 不同种植模式下周年干物质生产效率及分配 4 种不同种植模式周年干物质生产效率及分配情况见表 4。可知,4 种植模式干物质生产在季节分配上存在不同,周年干物质生产在模式 2 下达到最高,其次为模式 1。其中模式 1、模式 2 周年干物质生产效率比模式 3、模式 4 各增加 20 076.44、8 697.99 $\text{kg} \cdot \text{hm}^2$ 和 22 340.25、10 961.8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^2$;干

物质生产效率各提高 111.04%、29.53%和 123.56%、37.21%。模式 4 干物质生产效率较模式 3 高 11 378.45 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,干物质生产效率提高 38.62%。显著性结果分析显示:一年两作种植模式(模式 1 与模式 2)与模式 3、模式 4 在周年干物质生产效率方面存在显著性差异,单作棉花与单作春播玉米存在显著性差异,一年两作的两种种植模式之间不存在显著性差异。说明一年两作种植模式较单作种植模式在周年干物质生产效率方面存在优势。

2.2.2 不同种植模式下周年能量生产 4 种不同种植模式周年能量生产情况见表 5。可发现周年能量生产变化趋势与周年干物质生产效率一致。周年干物质生产在模式 2 下达到最高,其次为模式 1。其中模式 1、模式 2 周年干物质产能比模式 3、模式 4 各增加 34.51、14.91 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 38.35、18.75 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;

表 3 不同种植模式下作物生育进程比较

Table 3 Comparison of crop growth process under different planting models

种植模式 Planting model	年度 Year	第一季 First crop			第二季 Second crop		
		播种日期 Sowing date	收获日期 Harvesting date	生育期 Growth period/d	播种日期 Sowing date	收获日期 Harvesting date	生育期 Growth period/d
模式 1 Model 1	2011	2018-03-28	2018-07-04	98	2018-07-11	2018-10-12	93
	2012	2018-04-01	2018-07-06	96	2018-07-15	2018-10-10	87
模式 2 Model 2	2011	2018-03-28	2018-07-04	98	2018-07-08	2018-10-02	86
	2012	2018-04-01	2018-07-06	96	2018-07-11	2018-10-02	83
模式 3 Model 3	2011	2018-04-27	2018-10-10	166			
	2012	2018-05-01	2018-10-05	157			
模式 4 Model 4	2011	2018-04-27	2018-09-12	138			
	2012	2018-04-29	2018-09-15	139			

注:2011 年与 2012 年日积温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 日期平均在每年 4 月 1 日至 10 月 1 日期间。

Note: The dates of average daily accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ in 2011 and 2012 were from April 1 to October 1 every year.

表 4 不同种植模式下周年干物质生产效率及分配/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 4 Annual dry matter production efficiency and distribution under different planting models

种植模式 Planting model	年度 Year	第一季 First crop				第二季 Second crop				周年 Anniversary			
		叶片 Leave	茎秆 Stem	果穗 Ear	全株 Whole plant	叶片 Leave	茎秆 Stem	果穗 Ear	全株 Whole plant	叶片 Leave	茎秆 Stem	果穗 Ear	全株 Whole plant
模式 1 Model 1	2011	2098.00	4461.72	10684.10	17243.82	3586.07	8913.93	8444.73	20944.73	5684.07	13375.65	19128.83	38188.55
	2012	2025.50	4560.08	10878.50	17464.08	3600.10	8893.25	8169.00	20662.35	5625.60	13453.33	19047.50	38126.43
	平均 Average	2061.75	4510.90	10781.30	17353.95	3593.09	8903.59	8306.87	20803.54	5654.84	13414.49	19088.17	38157.49a
模式 2 Model 2	2011	2098.00	4461.72	10684.10	17243.82	4497.41	9720.21	8704.68	22922.30	6595.41	14181.93	19388.78	40166.12
	2012	2025.50	4560.08	10878.50	17464.08	4787.56	10155.40	8269.44	23212.40	6813.06	14715.48	19147.94	40676.48
	平均 Average	2061.75	4510.90	10781.30	17353.95	4642.49	9937.81	8487.06	23067.35	6704.24	14448.71	19268.36	40421.30a
模式 3 Model 3	2011	3347.80	4073.60	10377.80	17799.20					3347.80	4073.60	10377.80	17799.20
	2012	3129.70	4231.50	11001.70	18362.90					3129.70	4231.50	11001.70	18362.90
	平均 Average	3238.75	4152.55	10689.75	18081.05					3238.75	4152.55	10689.75	18081.05c
模式 4 Model 4	2011	4500.00	11089.00	13748.00	29337.00					4500.00	11089.00	13748.00	29337.00
	2012	4467.00	10795.00	14320.00	29582.00					4467.00	10795.00	14320.00	29582.00
	平均 Average	4483.50	10942.00	14034.00	29459.50					4483.50	10942.00	14034.00	29459.50b

干物质产能各提高 102.68%、28.02% 和 114.1%、35.24%。模式 4 干物质产能较模式 3 高 19.60 MJ · m⁻²,干物质生产效率提高 58.32%。显著性结果分析显示:一年两作种植模式(模式 1 与模式 2)与模式 3、模式 4 在周年能量生产方面存在显著性差异,模式 3 与模式 4 存在显著性差异,一年两作两种种植模式之间不存在显著性差异。说明,与现行模式 3、模式 4 种植模式相比,一年两作种植模式的周年能量表现出较高的优势,表明了一年两作模式对全年太阳辐射有相对较高的固定、转化和利用能力。

2.3 不同种植模式下作物光能资源分配与利用

太阳辐射是地理环境大部分自然过程中最基本、最直接的能源基础,也是地面热量平衡的重要

组成部分,对于评估农业生产具有重要意义。4 种不同种植模式下作物光能资源分配与利用对比情况见表 6,可以看出不同种植模式下年总辐射的分配与利用存在差异。4 种不同种植模式太阳总辐射大小表现为:模式 1>模式 2>模式 3>模式 4,模式 4 由于生育期较短,因此其年总辐射的分配量少。模式 1 年总辐射最大,其中春小麦分配量占太阳总辐射分配率的 38.95%,复播青贮玉米占 32.98%;与春麦后复播油葵相比,春麦后复播青贮玉米总辐射占模式 2 太阳总辐射率的 31.23%,周年太阳总辐射分配率不存在显著性差异。与模式 3、模式 4 相比,模式 1 在年总辐射分配量上提高显著,增量分别为13.37%、30.17%,模式 2 较模式 3、4 提高分别为10.76%、27.16%。

表 5 不同种植模式下周年能量生产/(MJ · m⁻²)

Table 5 Annual energy production under different planting models

种植模式 Planting model	年度 Year	第一季 First crop				第二季 Second crop				周年 Anniversary			
		叶片 Leaves	茎秆 Stem	果穗 Ear	全株 Whole plant	叶片 Leaves	茎秆 Stem	果穗 Ear	全株 Whole plant	叶片 Leaves	茎秆 Stem	果穗 Ear	全株 Whole plant
模式 1 Model 1	2011	3.66	7.79	18.66	30.11	6.52	16.21	15.35	38.08	10.18	24.00	34.01	68.19
	2012	3.54	7.96	19.00	30.49	6.55	16.17	14.85	37.57	10.08	24.13	33.85	68.06
	平均 Average	3.60	7.88	18.83	30.30	6.53	16.19	15.10	37.82	10.13	24.06	33.93	68.12a
模式 2 Model 2	2011	3.66	7.79	18.66	30.11	8.12	17.56	15.72	41.40	11.79	25.35	34.38	71.51
	2012	3.54	7.96	19.00	30.49	8.65	18.34	14.94	41.92	12.18	26.30	33.93	72.42
	平均 Average	3.60	7.88	18.83	30.30	8.38	17.95	15.33	41.66	11.98	25.83	34.15	71.96a
模式 3 Model 3	2011	6.22	7.57	19.29	33.09					6.22	7.57	19.29	33.09
	2012	5.82	7.87	20.45	34.14					5.82	7.87	20.45	34.14
	平均 Average	6.02	7.72	19.87	33.61					6.02	7.72	19.87	33.61c
模式 4 Model 4	2011	8.13	20.03	24.83	52.99					8.13	20.03	24.83	52.99
	2012	8.07	19.50	25.86	53.43					8.07	19.50	25.86	53.43
	平均 Average	8.10	19.76	25.35	53.21					8.10	19.76	25.35	53.21b

表 6 不同种植模式下作物光能资源分配与利用

Table 6 Distribution and utilization of crop light energy resources under different planting models

种植模式 Planting model	年度 Year	太阳总辐射分配率/% Total solar radiation distribution rate			太阳总辐射生产效率/(g · MJ ⁻¹) Total solar radiation production efficiency			年总辐射利 用效率/% Annual total radiation utilization efficiency
		第一季 First crop	第二季 Second crop	周年 Anniversary	第一季 First crop	第二季 Second crop	周年 Anniversary	
模式 1 Model 1	2011	39.41	33.44	72.86	0.80	1.15	0.96	1.72
	2012	38.48	32.52	70.99	0.83	1.16	0.98	1.76
	平均 Average	38.95	32.98	71.93a	0.82	1.16	0.97a	1.74a
模式 2 Model 2	2011	39.41	31.73	71.14	0.80	1.32	1.03	1.84
	2012	38.48	30.91	69.38	0.83	1.38	1.07	1.91
	平均 Average	38.95	31.32	70.26a	0.82	1.35	1.05a	1.88a
模式 3 Model 3	2011	64.24		64.24	0.51		0.51	0.94
	2012	62.64		62.64	0.54		0.54	1.00
	平均 Average	63.44		63.44b	0.52		0.52b	0.97b
模式 4 Model 4	2011	55.91		55.91	0.96		0.96	1.74
	2012	54.61		54.61	0.99		0.99	1.79
	平均 Average	55.26		55.26c	0.98		0.98a	1.76a

从表中还可以看出,一年两作种植模式与模式 4 在太阳总辐射生产效率与年总辐射利用效率方面不存在显著性差异,与模式 3 存在显著性差异。这是因模式 3 物质生产量相对较大,光能生产率相对较高,表现出较高的年总辐射利用效率,而模式 3 相对来说物质生产量较小,导致光能生产率较低,进而表现出较低的年总辐射利用效率。

2.4 不同种植模式下有效积温分配与温度生产效率

有效积温是反映生物生长发育对热量的需求或衡量地区热量资源的指标,因此研究不同种植模式下有效积温分配是有必要的。4 种不同种植模式有效积温分配与温度生产效率的具体情况见表 7,从表 7 中看出,在全年有效积温的利用上,模式 1、模式 2 周年有效积温分配率分别为 98.79%、96.76%,显著性分析显示,一年两作模式与模式 3 在有效积温分配率上不存在显著性差异,而一年两作模式和模式 3 与模式 4 之间存在显著性差异,这是由于模式 3 生育期较长,有效积温利用率相对较高。在温度生产效率上,模式 1 相较于模式 3、模式 4 温度生产效率分别提高 101.34%、4.8%,在温度生产效率上模式 1 与模式 3 之间差异显著,与模式 4 之间差异不显著;模式 2 较于模式 3、模式 4 温度生产效率分别提高了 117.75%、13.33%,在温度生产效率上模式 2 与模式 3 之间差异显著,与模式 4 之间差异不显著;模式 2 较模式 3、模式 4 温度生产率分别提高了 117.75%和 13.33%,在温度生产效率上模式 2 与模式 3 之间差异显著,与模式 4 之间差异不显著。

2.5 不同种植模式下水肥资源消耗利用分析

灌溉水利用效率反映了灌溉水量的投入产出效率,是衡量农业生产水平和农业用水科学性与合理性的综合指标,也是节水灌溉与高效农业发展的

重要指标之一^[31]。肥料偏生产力是指施用某一特定肥料下的作物产量与施肥量的比值,可反映当地土壤基础养分和化肥施用量的综合效应。结合表 1 和 $iWUE$ 、 PFP 公式计算 4 种不同种植模式资源消耗利用情况,具体数据分析见表 8。可看出,周年水分生产效率总体表现为:模式 4>模式 2>模式 1>模式 3,不同种植模式下水分生产效率与肥料偏生产力存在差异,其中模式 2、模式 4 与模式 1 和模式 3 之间存在显著性差异,模式 1 与模式 3 之间不具有显著性差异;肥料偏生产力与水分生产效率表现出相同变化趋势。由于玉米属于高产作物,模式 4 下单作春播玉米与模式 2 下复播青贮玉米在水分生产效率与肥料偏生产力方面均表现出较高水平。模式 1 下春小麦复播油葵与单作棉花相比,水分生产效率与肥料偏生产力均有所提高,分别提高 16.1%、8.77%,不具有显著性差异。由此可见,在考虑水肥资源利用因素条件下,若考虑一年两作种植模式可选择模式 2;若考虑单作种植模式可选择模式 4。

2.6 不同种植模式下经济效益对比分析

4 种不同种植模式下经济效益的对比见表 9,可以看出:模式 3 的全年经济效益最高,比模式 1、模式 2 及模式 4 每公顷收益分别增加 7 323.72、1 478.14、3 296.57 元,效率分别提高 50.11%、7.22%、17.68%。从经济效益方面分析,由于棉花具有更好的市场价值,收购单价相对较高,导致其经济效益较高。对比模式 1、模式 2 与模式 4,这 3 种植植模式相对于棉花均具有资源高效的特点,在这 3 种植植模式中,模式 2 相对于其他两种种植模式具有较高的经济效益,分别提高 39.99%、9.75%。由此可见,模式 2 兼具有高效资源和较好的经济效益。

表 7 不同种植模式下有效积温分配与温度生产效率

Table 7 Effective accumulated temperature distribution and temperature production efficiency under different planting models								
种植模式 Planting model	年度 Year	有效积温分配率/% Effective accumulated temperature distribution rate			温度生产效率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) Temperature production efficiency			年总温度利 用效率/% Annual total temperature utilization efficiency
		第一季	第二季	周年	第一季	第二季	周年	
		First crop	Second crop	Anniversary	First crop	Second crop	Anniversary	
模式 1 Model 1	2011	43.44	55.39	98.83	9.30	8.86	9.05	98.83
	2012	43.37	55.37	98.74	9.25	8.57	8.86	98.74
	平均 Average	43.41	55.38	98.79a	9.27	8.71	8.96b	98.79
模式 2 Model 2	2011	43.44	53.35	96.79	9.30	10.06	9.72	96.79
	2012	43.37	53.35	96.72	9.25	9.99	9.65	96.72
	平均 Average	43.41	53.35	96.76a	9.27	10.02	9.69a	96.76
模式 3 Model 3	2011	94.15		94.15	4.43		4.43	94.15
	2012	94.47		94.47	4.46		4.46	94.47
	平均 Average	94.31		94.31a	4.45		4.45c	94.31
模式 4 Model 4	2011	79.88		79.88	8.60		8.60	79.88
	2012	79.87		79.87	8.50		8.50	79.87
	平均 Average	79.88		79.88b	8.55		8.55b	79.88

表 8 不同种植模式下资源消耗利用
Table 8 Resource consumption and utilization under different planting models

种植模式 Planting model	年度 Year	产量/(kg·hm ⁻²) Yield			灌溉水利用率/(kg·m ⁻³) Irrigation water use efficiency			肥料偏生产力/(kg·kg ⁻¹) Fertilizer partial productivity		
		第一季 First crop	第二季 Second crop	周年 Anniversary	第一季 First crop	第二季 Second crop	周年 Anniversary	第一季 First crop	第二季 Second crop	周年 Anniversary
模式 1 Model 1	2011	6891.44	3681.02	10572.46	1.48	1.23	1.38	8.67	5.54	7.24
	2012	6782.35	3628.63	10410.98	1.46	1.21	1.36	8.53	5.46	7.13
	平均 Average	6836.90	3654.83	10491.72b	1.47	1.22	1.37c	8.60	5.50	7.19c
模式 2 Model 2	2011	6891.44	80914.63	87806.07	1.48	24.90	11.11	8.67	117.27	59.13
	2012	6782.35	78062.50	84844.85	1.46	24.02	10.74	8.53	113.13	57.13
	平均 Average	6836.90	79488.57	86325.46a	1.47	24.46	10.93b	8.60	115.20	58.13b
模式 3 Model 3	2011	5433.45		5433.45	1.21		1.21	6.79		6.79
	2012	5144.12		5144.12	1.14		1.14	6.43		6.43
	平均 Average	5288.79		5288.79c	1.18		1.18c	6.61		6.61c
模式 4 Model 4	2011	112500.00		112500.00	28.13		28.13	163.04		163.04
	2012	105000.00		105000.00	26.25		26.25	152.17		152.17
	平均 Average	108750.00		108750.00a	27.19		27.19a	157.61		157.61a

表 9 不同种植模式经济效益对比
Table 9 Comparison of economic benefits under different planting models

种植模式 Planting model		产量 Yield	产值 Output value	成本 Cost	单季效益 One-season benefit	全年效益 Annual benefit
		/(kg·hm ⁻²)	/(Yuan·hm ⁻²)	/(Yuan·hm ⁻²)	/(Yuan·hm ⁻²)	/(Yuan·hm ⁻²)
模式 1 Model 1	春小麦 Spring wheat	6836.90	13947.28	6450.00	7497.28	14616.60
	复播油葵 Multipte cropping oil sunflower	3654.83	14619.32	7500.00	7119.32	
模式 2 Model 2	春小麦 Spring wheat	6836.90	13947.28	6450.00	7497.28	20462.18
	复播油葵 Multipte cropping oil sunflower	79448.57	19464.90	6500.00	12964.90	
模式 3 Model 3	单作棉花 Single cotton	5288.79	42310.32	20370.00	21940.32	21940.32
模式 4 Model 4	单作春播玉米 Single crop spring sowing maize	108750.00	26643.75	8000.00	18643.75	18643.75

3 讨 论

一年两作种植模式作为一种优化的高效种植模式,具有资源利用率高、光温生产效率高等优点。而在北疆地区该种植模式推广率较低,棉花单季种植依然占据主导地位。本文在前人研究基础上针对北疆开展一年两作种植模式研究,通过与现行单作棉花、单作春播玉米两种种植模式对比分析,在考虑资源环境利用率、水肥资源消耗利用及经济效益因素下,探讨一年两作种植模式在该地区的适宜性与优越性,为该地区未来调节作物生产提供优化

种植模式,同时也为生态区内实行种植模式的多元化提供科学依据。

一年两作种植模式具有高物质生产能力和高光能利用能力。在本试验研究中,一年两作种植模式相对于单作种植模式在干物质生产效率及分配、周年能量生产、年总辐射利用率、总辐射生产效率、有效积温分配率及温度生产效率上优势显著,这与前人关于一年两作光热资源利用效率的研究结果一致^[15,17]。本研究得出,该地区一年两作种植模式对全年太阳辐射有相对较高的固定、转化和利用能力,同时在一定程度上延长了复播作物与光热资源

最佳光温耦合时间,使麦后太阳辐射与温度得到充分利用,提高了光热利用效率。热量资源是限制作物生长和影响生态区种植制度的关键因素。有研究表明,复种指数受积温影响较大,生态区内复种条件需满足 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 $4\,000^{\circ}\text{C}$ 以上^[32]。本试验研究中,在热量资源丰富的北疆地区,春小麦从播种到收获需要有效积温 $1\,872^{\circ}\text{C}$,复播油菜需有效积温 $2\,388^{\circ}\text{C}$,复播青贮玉米需有效积温 $2\,301^{\circ}\text{C}$ 。因此北疆地区生态区内有效积温大于 $4\,260^{\circ}\text{C}$ 就可推行该种植模式。这与张占琴等^[14]研究结果一致。在水肥资源利用消耗与经济效益方面,一年两作种植模式并没有表现出优势。这与王美云等^[17,33]研究结果存在差异。由于棉花较高的市场价值以及单作春播玉米高效生产能力,使得一年两作相较于两种单作种植模式在水肥资源利用与经济效益方面优势不明显。

在我国南方传统多熟区熟制大幅下降的情况下,在北疆地区发展一年两作模式也存在一些问题及挑战。北疆生态区内秋季温度下降较快,气候条件不佳,而热量资源作为限制第一季出苗及第二季成熟的主要因素,可能存在热量不足风险;水资源短缺及水肥利用效率低下已成为限制生态区内农业发展的主要因素,与单作种植模式相比,水肥资源对一年两作种植模式的限制更加明显,可能存在水资源供给不足情况。针对以上问题,在北疆生态区内推行一年两作种植模式要精准控制第一季播种时间,保证出苗率,在第一季收获后免耕复播第二季,抢占农时,统筹第二季作物前期水肥供应,实现作物前期生物量的快速增长,保障第二季作物成功收获;针对水肥资源限制情况,应针对相应作物开展针对性研究,确定最优水肥施用量,达到节水节肥的目的;从而在一定程度上避免风险,保证一年两作种植模式的成功实施。

4 结 论

1) 本试验研究结果表明,春小麦从生育期内需有效积温 $1\,872^{\circ}\text{C}$,复播油菜需 $2\,388^{\circ}\text{C}$,复播青贮玉米需 $2\,301^{\circ}\text{C}$ 。因此北疆地区有效积温大于 $4\,260^{\circ}\text{C}$ 就可推行该种植模式。

2) 相对于单作种植模式,一年两作种植模式在干物质生产效率及分配、周年能量生产具有明显优势。一年两作种植模式在一定程度上延长了复播作物与光热资源最佳光温耦合时间,可使麦后太阳

辐射与温度得到充分利用。春小麦—复播青贮玉米模式(模式2)年总辐射利用率、总辐射生产效率、有效积温分配率及温度生产效率均达到最大值,使光热资源得到了更加高效的利用。

3) 一年两作种植模式在水肥资源利用消耗与经济效益方面的表现与其生态效益方面存在差异,但一年两作种植模式可使生态区内种植模式趋于多元化。

参 考 文 献:

- [1] 刘巽浩. 中国的多熟种植[M]. 北京: 农业大学出版社, 1987: 1-5.
- [2] 程延年. 气候变化对北京地区小麦玉米两熟种植制度的影响[J]. 华北农学报, 1994, 9(1): 18-24.
- [3] 纪瑞鹏, 班显秀, 张淑杰. 辽宁冬小麦北移热量资源分析及区划[J]. 农业现代化研究, 2003, 24(4): 264-266.
- [4] 郝志新, 郑景云, 陶向新. 气候变暖背景下的冬小麦种植北界研究——以辽宁省为例[J]. 地理科学进展, 2001, 20(3): 254-261.
- [5] 黄川容, 刘洪. 气候变化对黄淮海平原冬小麦与夏玉米生产潜力的影响[J]. 中国农业气象, 2011(s1): 118-123.
- [6] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 329-336.
- [7] 张厚瑄. 中国种植制度对全球气候变化响应的有关问题 II. 我国种植制度对气候变化响应的主要问题[J]. 中国农业气象, 2000, 21(2): 10-13.
- [8] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis report. Intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [9] Tao F, Yokozawa M, Xu Y, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2006, 138(1): 82-92.
- [10] Wang J. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. Climatic Change, 2012, 113(3-4): 825-840.
- [11] 杜红, 路锦燕. 石河子垦区太阳辐射特征分析[J]. 现代农业科技, 2009, (16): 238-239.
- [12] 王健, 吕新, 王江丽. 石河子市近 57 年积温变化趋势特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(6): 154-159.
- [13] 周春江, 刘景德. 新疆引进非传统小麦套种玉米耕作技术试验示范初报(1999—2000)[J]. 作物杂志, 2001, (4): 1-4.
- [14] 张占琴, 魏建军, 杨相昆, 等. 北疆“一年两作”冬小麦-复播青贮玉米模式物质生产及资源利用率研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, (6): 28-33.
- [15] 周宝元, 王志敏, 岳阳, 等. 冬小麦-夏玉米与双季玉米种植模式产量及光温资源利用特征比较[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1393-1405.
- [16] 王美云, 任天志, 赵明, 等. 双季青贮玉米模式物质生产及资源利用效率研究[J]. 作物学报, 2007, 33(8): 1316-1323.
- [17] 李立娟, 王美云, 薛庆林, 等. 黄淮海双季玉米产量性能与资源效率的研究[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1229-1234.
- [18] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业

(上接第 124 页)

- [17] Li L, Sun J H, Zhang F S. Intercropping with wheat leads to greater root weight density and larger below-ground space of irrigated maize at late growth stages[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2011, 57(1):61-67.
- [18] Fortier J, Gagnon D, Truax B, et al. Biomass and volume yield after 6 years in multiclonal hybrid poplar riparian buffer strips[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(7):1028-1040.
- [19] Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Hansen N C, et al. Winter cereal root growth and aboveground-belowground biomass ratios as affected by site and tillage system in dryland Mediterranean conditions[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1-2):925-939.
- [20] Bayala J, Teklehaimanot Z, Ouedraogo S J. Fine root distribution of pruned trees and associated crops in a parkland system in Burkina Faso[J]. Agroforestry Systems, 2004, 60(1):13-26.
- [21] 鲁为华, 任爱天, 杨洁晶, 等. 滴灌苜蓿田间土壤水盐及苜蓿细根的空间分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23):128-137.
- [22] 郭正刚, 刘慧霞, 王彦荣. 刈割对紫花苜蓿根系生长影响的初步分析[J]. 西北植物学报, 2004, 24(2):215-220.
- [23] Livesley S J, Gregory P J, Buresh R J. Competition in tree row agroforestry systems. 3. Soil water distribution and dynamics[J]. Plant and Soil, 2004, 264(1/2):129-139.
- [24] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性[J]. 生态学报, 2006, 26(12):4164-4170.
- [25] Eissenstat D M, Yanai R D. The Ecology of Root Lifespan[J]. Advances in Ecological Research, 1997, 27:1-60.
- [26] Wang B J, Zhang W, Ahanbieke P, et al. Interspecific interactions alter root length density, root diameter and specific root length in jujube/wheat agroforestry systems[J]. Agroforestry Systems, 2014, 88(5):835-850.
- [27] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3):435-438.
- [28] 裴宗平, 余莉琳, 汪云甲, 等. 4种干旱区生态修复植物的苗期抗旱性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3):204-208.
- [29] Upson M A, Burgess P J. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1-2):43-58.
- [30] Duan Z P, Gan Y W, Wang B J, et al. Interspecific interaction alters root morphology in young walnut/wheat agroforestry systems in northwest China[J]. Agroforestry Systems, 2019, 93:419-434.
- [31] Quemé A, Battie-Laclau P, Dufour L, et al. Effects of walnut trees on biological nitrogen fixation and yield of intercropped alfalfa in a Mediterranean agroforestry system[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 84:35-46.
- [32] Ledgard S F, Steele K W. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures[J]. Plant and Soil, 1992, 141:137-153.
- [33] Zhang W, Wang B J, Gan Y W, et al. Competitive interaction in jujube tree/cotton agroforestry system in Xinjiang province, northwestern China[J]. Agroforestry Systems, 2019, 93:591-605.