

# 旱地基于豆类绿肥不同轮作方式的经济效益分析

姚致远<sup>1</sup>, 王 峥<sup>1</sup>, 李 婧<sup>1</sup>, 鱼昌为<sup>2</sup>, 曹群虎<sup>2</sup>, 曹卫东<sup>3</sup>, 高亚军<sup>1,4\*</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 陕西省长武县农业技术推广中心, 陕西长武 713600; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 4 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:**【目的】黄土高原旱地土壤贫瘠, 传统的夏休闲期雨热资源丰富但利用率不高, 评价不同轮作方式的经济效益, 为选择一种合理的种植模式、保证农民获得可靠的收入提供依据。【方法】本研究通过 4 年定位试验, 以夏休闲-冬小麦一年一熟制为对照, 测定并分析了豆类绿肥-冬小麦和豆类绿肥-春玉米-冬小麦两种轮作方式及其不同豆类绿肥处理方式条件下的经济效益。【结果】豆类绿肥-冬小麦轮作经济效益最低, 而且纯收入的变异系数高达 67.69%, 与夏休闲-冬小麦轮作方式相比没有优势; 该轮作绿肥不同翻压时间对作物产量、总收入等指标存在年际差异。豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作, 整体收入最高, 而且纯收入变异系数最低, 为 15.42%, 其中茎秆覆盖和茎秆翻压处理的作物产量、总收入、纯收入等均高于移出处理。【结论】从农民收入的角度来看, 豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作很好的平衡了成本与收益的关系, 是该地区较为合理的种植制度; 将绿肥籽粒收获后, 茎秆覆盖式翻压, 可有效提高小麦、玉米的产量, 是应推广的技术措施。

**关键词:** 旱地; 豆类绿肥; 轮作; 经济效益

中图分类号: S551; S553 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)01-0076-09

## Profit analysis of different rotations based on leguminous green manure in dryland area

YAO Zhi-yuan<sup>1</sup>, WANG Zheng<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, YU Chang-wei<sup>2</sup>, CAO Qun-hu<sup>2</sup>, CAO Wei-dong<sup>3</sup>, GAO Ya-jun<sup>1,4\*</sup>

(1 College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Shaanxi Changwu District Agro-technology Extension Center, Changwu, Shaanxi 713600, China; 3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objectives】 In dryland area of Loess Plateau, soil is barren, and the heat and precipitation resources can hardly be fully utilized during summer fallow period. Therefore, a better cropping system is needed to secure the farmer's income depending on the results of a profit analysis of different rotations. 【Methods】 A 4-year field trial was conducted to assess economic benefits of two rotations and corresponding green manure treatments. Leguminous green manure-winter wheat (LG-WW) and leguminous green manure-spring maize-winter wheat (LG-SM-WW) were compared with summer fallow-winter wheat (SF-WW) as control, a widely applied rotation in local area. 【Results】 LG-WW has the lowest economic benefits, and the coefficient of variation (CV) of net benefits for LG-WW is 67.69%, which indicates the rotation thus couldn't replace the traditional SF-WW. The differences of wheat yields and gross revenue among the green manure treatments for this rotation vary from year to year. LG-SM-WW has the highest gross revenue and the lowest CV (15.42%) of net benefits among the three rotation systems, which implies that farmers could achieve a high and stable income by applying this rotation. Crops yields and economic benefits under the straw mulch and incorporation treatments for this rotation are higher than

收稿日期: 2014-09-11 接受日期: 2014-11-04 网络出版日期: 2015-07-24

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103005, 201503124); 国家小麦现代产业技术体系建设专项经费项目; 教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-08-0465); 农业科研杰出人才及其创新团队培养计划资助。

作者简介: 姚致远(1990—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事土壤与肥料方面的研究工作。E-mail: zyyao90@vip.qq.com

\* 通信作者 E-mail: yajungao@nwsuaf.edu.cn

those of move-away treatment in LG-SM-WW rotation. **【Conclusions】** Legume-summer maize-whinter wheat rotation is the most profitable cropping system in the dryland of Loess Plateau. After harvesting the pods of legumes, the straw is recommended to mulching or incorporated for higher yield of maize and wheat.

**Key words:** dryland; leguminous green manure; rotation; economic benefit

夏休闲-冬小麦一年一熟轮作制是渭北旱塬应用最广的种植制度,每年从6月中下旬小麦收获后到9月中下旬小麦播种前有2~3个月的夏休闲期,利用这一段降水丰富期为随后种植的冬小麦储存水分。但由于这一时期气温高,裸地休闲无植被覆盖,储水效率通常很低<sup>[1-3]</sup>。当地另一种较常见的豆类-春玉米-冬小麦两年三熟种植制度是在收获豆类籽粒后将茎叶移出田间,冬休闲到翌年五月初前后播种春玉米。该轮作增加了种植作物的种类,能解决部分小麦单作中存在的问题,但是该轮作在豆子收后将作物茎叶移出田间,加上冬休闲期间土壤多进行耕翻,在漫长多风少降水的冬季,加剧了有机碳和水分的无效损失。豆类茎叶移出田间,使其中的养分不能归还土壤,进一步限制了作物产量的提高<sup>[4-5]</sup>。因此,这两种传统轮作方式不利于充分利用当地的水肥资源。

不同轮作制度经济效益存在差异。相对于小麦连作,在春季或夏休闲期加入不同的谷类和牧草类作物轮作,纯收入均会增加<sup>[6]</sup>;在小麦连作体系中引入小扁豆并收获籽粒比将其作为绿肥还田纯收入更高<sup>[7-10]</sup>。在小麦-玉米轮作体系中加入豆类绿肥,并收获其籽粒,不仅可增加轮作的整体收益,还有提高土壤有机碳含量、降低氮肥用量、提高小麦产量等诸多益处<sup>[8]</sup>。因此,本研究在现有的两种种植制度中合理利用豆类绿肥,以期达到既能更充分利用水热资源,又能提高经济效益的目的。但对于豆类绿肥-冬小麦轮作,由于夏休闲期种植绿肥通常会消耗较多土壤水分,可能导致小麦减产<sup>[9]</sup>,这种情况在干旱年份尤其严重。为此本研究设置了3种不同的豆类绿肥利用方式,以期在发挥绿肥功能的同时,提高轮作的整体效益。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验位于黄土高原中南部的陕西省长武县丁家镇十里铺村农技中心试验基地(35°12'787"N, 107°44'703"E),海拔1220 m,属西北内陆暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温9.1℃。该地区热量丰

富,年平均日照2226.5 h,积温2994℃,无霜期171 d。多年年平均降水588 mm,且季节性分布不均,多集中于夏秋季节,雨热同季(图1)。试验地所在地区的农业主要依靠作物生育期的天然降水和作物播前土壤蓄水,属于典型旱作农业区。试验地土壤类型是黄盖粘黑垆土,耕层土壤有机碳含量7.77 g/kg、全氮0.90 g/kg、硝态氮13.74 mg/kg、pH 7.50、全磷0.66 g/kg、速效磷4.02 mg/kg、速效钾131.95 mg/kg。

### 1.2 试验设计

本研究包括3种轮作制度:豆类绿肥-冬小麦(LG-WW)、豆类绿肥-春玉米-冬小麦(LG-SM-WW)和当地最常见的夏休闲-冬小麦(SF-WW)。豆类绿肥-冬小麦轮作设计了3种绿肥利用方式:1)提前翻压(early incorporation)小麦播前2~3周收割绿肥并随即翻压入土;2)提前覆盖(early mulch)小麦播前2~3周收割绿肥并覆盖地表,再在小麦播前翻压;3)播前翻压(late incorporation)小麦播前收割并翻压绿肥。豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作也设计了3种绿肥利用方式:1)茎秆覆盖(straw mulch)豆荚收获后,将茎叶覆盖在地表,翌年春玉米播前翻压;2)茎秆翻压(straw incorporation)收获豆荚后,翻压茎叶,翌年种春玉米;3)茎秆移出(move-away)模拟当地习惯,豆子成熟后将地上部分割掉并移出田间,翌年种春玉米。共7个处理,重复4次。为了操作方便,同一轮作制度的3个处理小区集中排列,小区面积108 m<sup>2</sup>。

田间试验始于2009年6月,2013年6月结束。其中豆类绿肥-冬小麦轮作完成4个轮作周期,豆类绿肥-春玉米-冬小麦完成2个轮作周期(表1)。豆类绿肥为当地普遍种植的大豆品种怀豆,小麦为长武521,玉米为沈单16。怀豆播种时间为6月中下旬,播前施用了30 kg/hm<sup>2</sup>豆类绿肥专用肥,40 kg/hm<sup>2</sup>磷肥或不施肥。但不同豆类绿肥播前施肥对绿肥和后季作物产量没有影响,因此在本文中未讨论;在化肥成本中将各处理豆类绿肥播前施肥的开支取平均值。小麦播种时间为9月下旬,播前一次性施用N 135 kg/hm<sup>2</sup>和P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg/hm<sup>2</sup>;玉米播种时间为4月中下旬,播前一

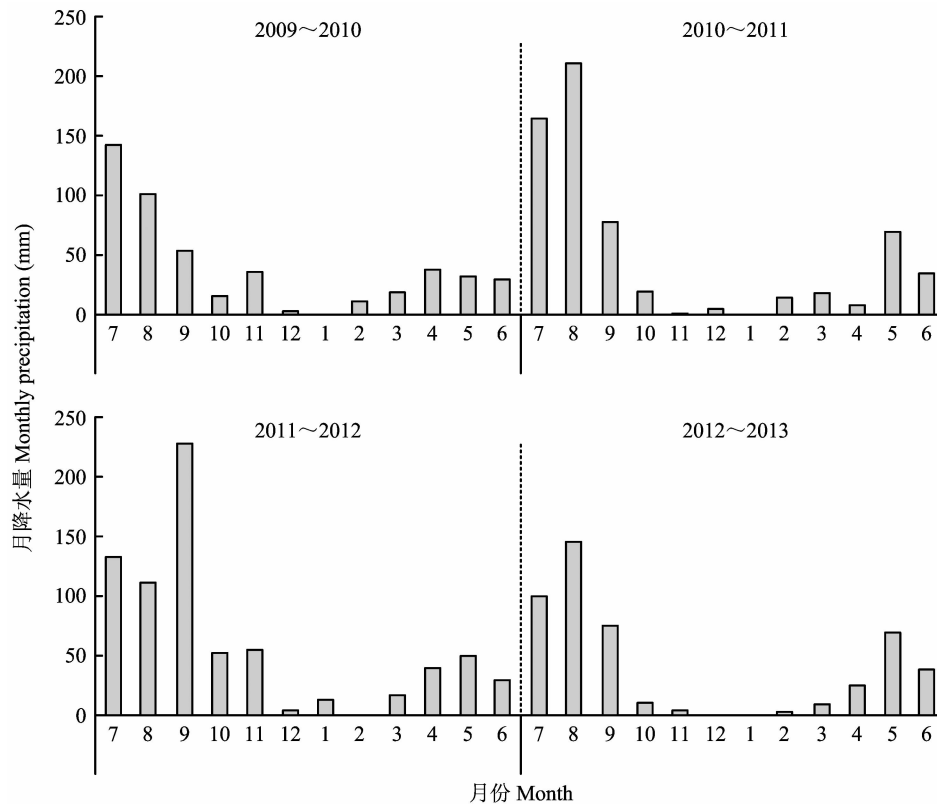


图 1 2009 ~ 2013 年月降水量

Fig.1 Monthly precipitation from 2009 to 2013

表 1 2009 ~ 2013 年各种作物的生长时期

Table 1 Growing periods of different crops from 2009 to 2013

轮作方式 Rotation	作物种类 Crop species	生长时期 Growing period	
LG-WW	怀豆 Huai bean	2009.7 ~ 2009.9	2011.7 ~ 2011.9
	冬小麦 Winter wheat	2009.10 ~ 2010.6	2011.10 ~ 2012.6
	怀豆 Huai bean	2010.7 ~ 2010.9	2012.7 ~ 2012.9
	冬小麦 Winter wheat	2010.10 ~ 2011.6	2012.10 ~ 2013.6
LG-SM-WW	怀豆 Huai bean	2009.7 ~ 2009.10	2011.7 ~ 2011.10
	春玉米 Spring maize	2010.5 ~ 2010.9	2012.5 ~ 2012.9
	冬小麦 Winterwheat	2010.10 ~ 2011.6	2012.10 ~ 2013.6

注 (Note): LG-WW—豆类绿肥-冬小麦 Leguminous green manure-winter wheat; SF-WW—夏休闲-冬小麦 Summer fallow-winter wheat; LG-SM-WW—豆类绿肥-春玉米-冬小麦 Leguminous green manure-spring maize-winter wheat.

次性施用 N 180 kg/hm<sup>2</sup> 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 豆类绿肥-冬小麦轮作制度的经济效益

总收入 (gross revenue, yuan/hm<sup>2</sup>) = 小麦籽粒产量 × 当年小麦市场价格

成本 (cost, yuan/hm<sup>2</sup>) = 豆类绿肥专用肥价格 × 施用量 + 豆类种子价格 × 播种量 + 豆类绿肥机械播种成本 + 豆类绿肥机械翻压成本 + 小麦施氮量 × 价格 + 小麦施磷量 × 磷肥价格 + 机械旋耕

成本 + 小麦机械播种成本 + 小麦种子价格 × 播种量

#### 1.3.2 豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作制度经济效益

总收入 (Gross revenue, yuan/hm<sup>2</sup>) = 怀豆籽粒产量 × 当年怀豆市场价格 + 玉米籽粒产量 × 当年玉米市场价格 + 小麦籽粒产量 × 当年小麦市场价格

成本 (Cost, yuan/hm<sup>2</sup>) = 豆类绿肥专用肥价格 × 施用量 + 豆类种子价格 × 播种量 + 豆类绿肥

机械播种 + 豆类绿肥茎秆机械翻压成本 + 玉米施氮量 × 氮肥价格 + 玉米施磷量 × 磷肥价格 + 玉米播前旋耕成本 + 玉米机械播种成本 + 玉米种子价格 × 播种量 + 地膜成本 + 小麦施氮量 × 氮肥价格 + 小麦施磷量 × 磷肥价格 + 小麦播前旋耕成本 + 小麦机械播成本 + 小麦种子价格 × 播种量

纯收入 (net benefit, yuan/hm<sup>2</sup>) = 总收入 - 成本

产投比 (output/input) = 总收入/成本

#### 1.4 数据处理

数据首先通过 Microsoft excel 2013 进行整理,再通过 SAS 8.2 (SAS Institute, Cary, USA) 软件进行方差分析 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同轮作制度作物产量

从表 2 可以看出,由于不同年份夏休闲期和生育期降水存在较大差异,豆类绿肥-冬小麦轮作条件下,2009~2010 年和 2012~2013 年小麦产量较低,2011~2012 年产量较高。与夏休闲-冬小麦轮作相比,夏季种植怀豆作为绿肥后,冬小麦产量在 2009~2010 年增加,2010~2011 年则显著降低,其它年份则无显著差异。3 种绿肥处理方式对小麦产量的影响也有年际差异,除 2009~2010 年绿肥提前翻压处理的小麦产量显著高于播前翻压与提前覆盖处理,之后年份不同翻压时间对产量无显著差异。

表 2 夏休闲-冬小麦和豆类绿肥-冬小麦不同绿肥处理方式小麦产量 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 2 Wheat yields in different rotations and green manure returning ways

轮作方式 Rotation	绿肥处理方式 Green manure returning way	小麦产量 Wheat yield			
		2009~2010	2010~2011	2011~2012	2012~2013
LG-WW	播前翻压 Late incorporation	1802 c	2741 b	5781 a	2085 a
	提前覆盖 Early mulch	2188 b	3090 b	5208 a	1953 a
	提前翻压 Early incorporation	2557 a	3189 b	5045 a	1953 a
SF-WW	无绿肥 No green manure	1790 c	4301 a	6038 a	2087 a

注 (Note): LG-WW—豆类绿肥-冬小麦 Leguminous green manure-winter wheat; SF-WW—夏休闲-冬小麦 Summer fallow-winter wheat; 同列不同小写字母表示同一年份处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters in the same column mean significant differences among treatments at the 0.05 level.

在豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作中,豆类绿肥茎秆翻压和覆盖处理的作物产量均高于移出处理,2011~2013 年玉米和小麦产量差异均达到显著水平;茎秆翻压的作物产量有高于覆盖处理的趋势,且两季小麦产量差异均达显著水平(表 3)。

在 2010~2011 年和 2012~2013 年,豆类绿肥

-春玉米-冬小麦与豆类绿肥-冬小麦轮作同时收获小麦。豆类绿肥-春玉米-冬小麦所有处理小麦产量在 2010~2011 略高于豆类绿肥-冬小麦,2012~2013 年显著高于后者,而且各处理减少了降水对小麦的影响,其产量稳定 3200~4300 kg/hm<sup>2</sup>。

表 3 豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作中怀豆茎秆不同处理方式的作物产量 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 3 Crops yields under different green manure returning ways in the leguminous green manure-spring maize-winter wheat

豆类绿肥处理方式 Green manure returning way	2009~2011			2011~2013		
	怀豆 Huai bean	玉米 Maize	小麦 Wheat	怀豆 Huai bean	玉米 Maize	小麦 Wheat
茎秆覆盖 Straw mulch	644 a	11642 a	3239 b	1497 a	9438 a	3934 b
茎秆翻压 Straw incorporation	688 a	11494 a	3554 a	1553 a	9554 a	4259 a
茎秆移出 Straw move-away	648 a	10504 a	3295 ab	1532 a	8894 b	3639 c

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一年份处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different lowercase letters in the same column mean significant differences among treatments at the 0.05 level.

## 2.2 不同轮作方式的成本

图2表明,与夏休闲-冬小麦相比,豆类绿肥-冬小麦轮作时种子成本增加 50.51% (2009~2011 年) 和 46.30% (2011~2013 年); 豆类绿肥-春玉米冬小麦轮作时种子成本的增加相对较小,分别为 17.68% (2009~2011 年) 和 23.15% (2011~2013 年),这主要是因为该轮作方式为两年三熟,4 年间少播种一次。田间管理成本方面,无论是豆类绿肥-冬小麦还是豆类绿肥-春玉米-冬小麦均比夏休闲-冬小麦高 40%~50%。在夏休闲期种植豆类绿肥会增大化肥成本,但是增加幅度相对都很小,如与夏休闲-冬小麦相比,豆类绿肥-冬小麦轮作时化肥投入增加 9.88% (2009~2011 年) 和 11.09% (2011~2013 年),豆类

绿肥-春玉米-冬小麦轮作时化肥投入增加 7.99% (2009~2011 年) 和 -1.88% (2011~2013 年)。

2011~2013 年成本总体上涨,但是化肥成本维持稳定或有小幅下降(表4),这主要是因为近几年尿素价格持续下降,施用尿素最多的豆类绿肥-春玉米-冬小麦受益于这一点,化肥成本下降了 9.33%; 种子成本在总成本所占比例不是最高(图2),但是相对 2009~2011 年增幅最大,3 种轮作方式种子成本的增幅均超过了 30%,豆类绿肥-春玉米-冬小麦种子成本达到了 42%; 田间管理成本上升幅度在 15%~25% 之间,豆类绿肥-春玉米-冬小麦由于少种植一年绿肥,田间管理费用上升幅度最低,为 15.38% (表4)。

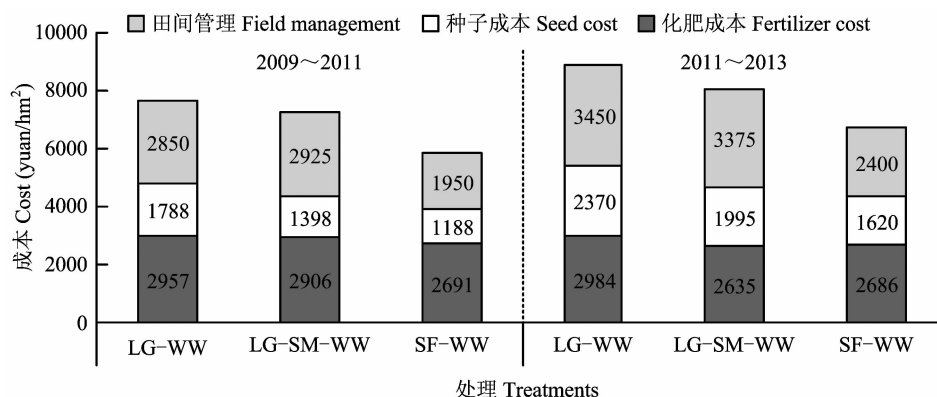


图2 不同轮作方式成本组成

Fig. 2 Cost composition of different rotations

[注(Note): LG-WW—豆类绿肥-冬小麦 Leguminous green manure-winter wheat; LG-SM-WW—豆类绿肥-春玉米-冬小麦 Leguminous green manure-spring maize-winter wheat; SF-WW—夏休闲-冬小麦 Summer fallow-winter wheat]

表4 2011~2013 年成本上升幅度明细(%)

Table 4 Details in cost increments of different rotations in 2011-2013

轮作方式 Rotation	化肥成本 Fertilizer cost	种子成本 Seed cost	田间管理 Filed management
LG-WW	0.90	32.55	21.05
LG-SM-WW	-9.33	42.70	15.38
SF-WW	-0.20	36.36	23.08

注(Note): LG-WW—豆类绿肥-冬小麦 Leguminous green manure-winter wheat; LG-SM-WW—豆类绿肥-春玉米-冬小麦 Leguminous green manure-spring maize-winter wheat; SF-WW—夏休闲-冬小麦 Summer fallow-winter wheat

## 2.3 不同轮作制度的经济效益

由表5可知,无论是2009~2011年还是2011~2013年,豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作的总收入、纯收入和产投比均显著高于豆类绿肥-冬小麦

和夏休闲-冬小麦,而夏休闲-冬小麦的纯收入和产投比在2009~2011年显著高于豆类绿肥-冬小麦,在2011~2013年则只有产投比显著增加。

豆类绿肥-冬小麦轮作条件下,2009~2011年绿肥播前翻压处理的总收入和纯收入显著低于绿肥提前覆盖和提前翻压,但2011~2013年则有相反的趋势。豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作条件下,绿肥茎秆移出处理的总收入、纯收入和产投比低于绿肥茎秆覆盖和茎秆翻压处理,2011~2013年其差异达到显著水平(表5)。

豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作体系中,玉米是总收入的主要组成部分。2009~2011年,各处理玉米收入占总收入的70%以上,小麦其次,占总收入的23%左右,怀豆由于产量很低,在总收入中所占比例仅为6%~7%(图3)。2011~2013年,玉米依然是收入的主要组成部分,但这一比例从2009~

表 5 不同处理经济效益指标 (yuan/hm<sup>2</sup>)  
Table 5 Economic benefits of different treatments

轮作方式 Rotation	绿肥处理方式 Green manure returning way	2009 ~ 2011			2011 ~ 2013		
		总收入 Gross revenue	纯收入 Net benefit	产投比 Output/ input	总收入 Gross revenue	纯收入 Net benefit	产投比 Output/ input
LG-WW	播前翻压 Late incorporation	9265 cC	1669 cD	1.22 cD	17932 aB	9128 aBC	2.04 bC
	提前覆盖 Early mulch	10774 bC	3179 bD	1.42 bcD	16340 aB	7536 aC	1.86 bC
	提前翻压 Early incorporation	11747 abC	4151 bCD	1.55 bcD	15982 aB	7178 aC	1.82 bC
SF-WW	无绿肥 No legume	12361 aC	6531 aC	2.12 aC	18501 aB	11795 aB	2.76 aB
LG-SM-WW	茎秆覆盖 Straw mulch	31048 aA	23819 aA	4.29 aA	34101 aA	26096 aA	4.26 aA
	茎秆翻压 Straw incorporation	30872 aAB	23643 aAB	4.27 aAB	35346 aA	27340 aA	4.42 aA
	茎秆移出 Move-away	28362 aB	21133 aB	3.92 aB	32401 bA	24396 bA	4.05 bA

注 (Note): LG-WW—豆类绿肥-冬小麦 Leguminous green manure-winter wheat; SF-WW—夏休闲-冬小麦 Summer fallow-winter wheat; LG-SM-WW—豆类绿肥-春玉米-冬小麦 Leguminous green manure-spring maize-winter wheat; 同列不同小写字母分别表示一年一熟轮作 (LG-WW 所有处理和 SF-WW) 或两年三熟轮作 (LG-SM-WW 所有处理) 处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters in the same column mean significant differences among one-crop-a-year rotation (all the treatments of LG-WW and SF-WW) or 3-crops-rotated-within-2-years rotation (all the treatments of LG-SM-WW) at  $P < 0.05$  level. 同列大写字母表示所有处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capital letters in the same column mean significant differences among all treatments at  $P < 0.05$  level.

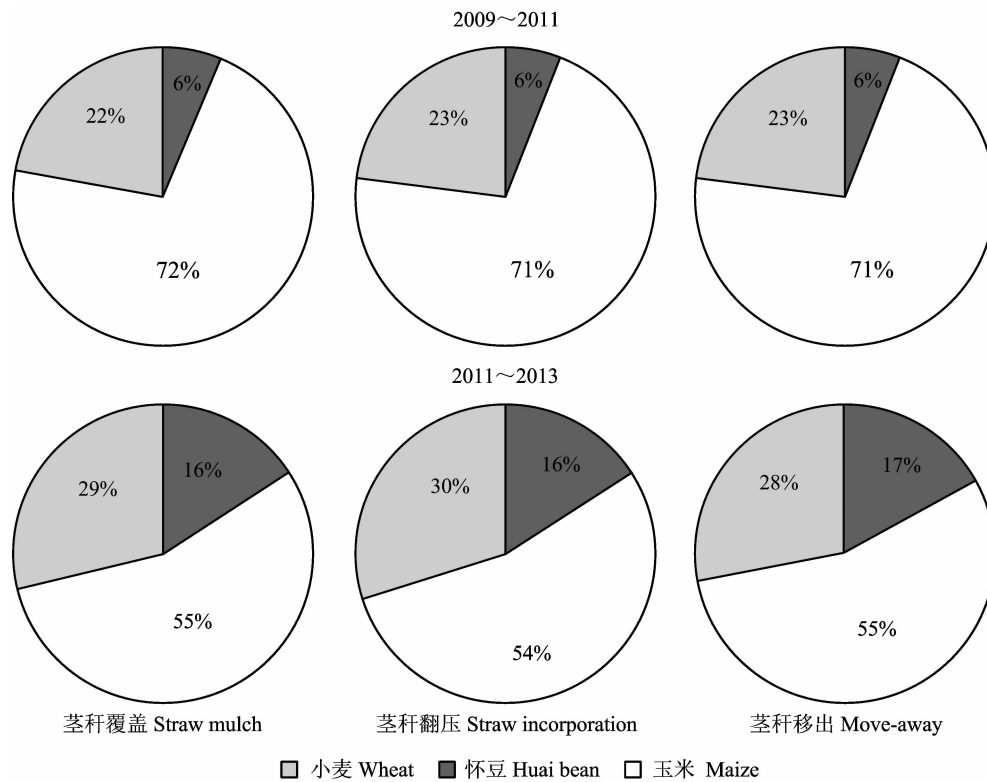


图 3 豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作方式下各农产品占总收入的比例

Fig. 3 The gross revenue proportion of different crops in the leguminous green manure-spring maize-winter wheat rotation

2011 年的 70% 左右降到了 55% 左右。一方面是因为玉米产量有所降低,另一方面是因为 2011~2013 年小麦产量稳定,售价上浮,其收入在总收入中的比

例上升了 5%~7% 时,怀豆产量有所提高,同时其相对较高的市场价格,在总收入中占的比例上升了 10% 左右 (图 3)。

### 3 讨论

#### 3.1 不同轮作方式的经济效益及农民的选择

种植作物的种类、轮作方式以及不同田间管理的选择将会影响农业生产的整体成本,进而在很大程度上决定最后能否获利<sup>[10]</sup>。本研究中,渭北旱塬地区受到降水偏少的限制,小麦产量通常不高。比如,在2009年,即使有60.7%的农民施氮量在160 kg/hm<sup>2</sup>以上,仍然有86.7%的农民小麦产量很低(<3000 kg/hm<sup>2</sup>)或偏低(3000~4000 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[11]</sup>。可见,增加投入通常不一定能换取很好的产量,因此为了保证收入,农民需要选择成本最低的轮作方式,即夏休闲-冬小麦轮作。而豆类绿肥-冬小麦轮作方式相对于传统的夏休闲-冬小麦轮作会增加成本,这种成本的增加主要来自于种子和田间管理(图2)。虽然在夏休闲期种植绿肥能减少氮肥的投入<sup>[12-13]</sup>,但化肥成本的减少幅度相对于种子和田间管理成本的增加幅度来说几乎可以忽略不计(图2)。而且,绿肥的减氮效果在某些地区可能需要经过多年才能显现。豆类绿肥通常能提供较多的养分,但是多数研究中计算的氮供应量都是仅包括地上部,而 Arcand 等<sup>[14]</sup>研究发现根系包括其生长期间的分泌物,脱落物等提供的氮占整个植物残体的35%~52%。因此豆类绿肥通常能提供较多的养分,有效降低肥料氮施用量。但是在本试验中,无论是豆类绿肥-冬小麦还是豆类绿肥-春玉米-冬小麦,在随后的作物播种前都没有相应的降低肥料氮投入量,使豆类绿肥,尤其是在豆类绿肥-冬小麦轮作中绿肥的效果难以体现。另一方面,对多数农民来说,在夏休闲期种植豆类绿肥需要直接经济投入以租用农机,在中国多数地区,农机数量依然难以满足农民需求,形成供求矛盾,这不仅是一笔不可忽视的开销,而且对农时安排也会带来诸多不便;同时,与种植豆类绿肥有关的人力投入也是一项重要的成本,但这项投入很难从本研究的数据上反映。此外,与夏季种植豆类绿肥相比,麦收后农田休闲能储存更多的水分供后季小麦生长,可能获得较高的产量(表2),从而增加总收入,收入也更稳定(图4)。总之,豆类绿肥-冬小麦轮作方式与夏休闲-冬小麦相比,具有较低的经济效益。对于农民来说,投入的多少,收入的高低才是选择轮作方式和种植作物种类的决定因素<sup>[7,15]</sup>。因此,如果没有政府补助,农民不太可能选择这种轮作方式。

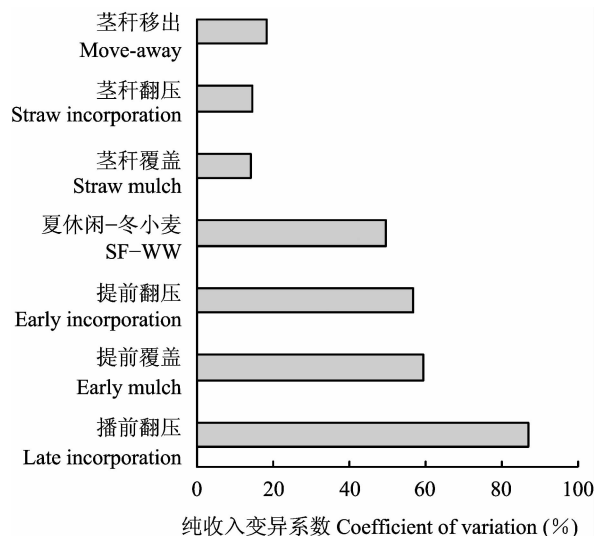


图4 不同处理纯收入的变异系数  
Fig. 4 The coefficient of variation of net benefit of all treatments

在一个轮作体系中包括多种作物时,某种作物的产量通常会高于其单作时的产量。伊利诺伊斯大学 Morrow Plots 始于1876年的轮作比较试验表明,单作玉米籽粒产量总是最低,而玉米和燕麦轮作产量居中,玉米-三叶草-燕麦轮作的产量最高<sup>[16]</sup>;在宾夕法尼亚的 Hunter 轮作试验中,玉米在处于包含多种作物的长周期的轮作(4~8年)时籽粒产量比玉米连续种植高10%~12%<sup>[17]</sup>。在本试验中,两年三熟的轮作方式总产量远高于豆类绿肥-冬小麦且小麦产量比对应年份的高,表明豆类绿肥-春玉米-冬小麦的轮作方式在渭北旱塬地区也有利于提升作物产量。除了轮作方式,轮作总产量主要受其中与当地自然环境匹配最好的作物产量影响<sup>[18]</sup>。在本研究中,玉米和长武怀豆与当地水热条件配合较好,并且玉米由于产量高,因此其产量占有最大比例,对总产量影响也最大;而小麦和怀豆的影响相对较小。与豆类绿肥-冬小麦轮作和夏休闲-冬小麦相比,豆类绿肥-春玉米-冬小麦能收获的作物产量高得多,而且产量相对较低的怀豆还有较高的市场价格,也有利于增加总收入。豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作方式的纯收入维持在20000 yuan/hm<sup>2</sup>以上,而豆类绿肥-冬小麦和夏休闲-冬小麦的收入则在12000 yuan/hm<sup>2</sup>以下(表5)。在豆类绿肥-冬小麦轮作下,豆类作为绿肥翻压时多数已结荚,田间试验期间雇佣的农民对全部翻压还田而放弃收获籽粒多表现出惋惜和不赞同,而豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作不仅很好的解决了这个矛盾,同时小麦产量在缺水的年份也较为稳定,因此更

有希望被农民所接受。

### 3.2 不同轮作方式收入的稳定性

轮作作物的多样化有利于缓解干旱<sup>[19]</sup>,增加水分和养分的利用效率<sup>[20-21]</sup>,且对营养元素有不同需求的各种作物进行轮换种植,能全面、均衡的利用土壤中的水分和养分<sup>[22]</sup>,进而减少额外的肥料投入<sup>[23-24]</sup>,同时能避免连年单作可能带来的病害问题<sup>[25-28]</sup>,减少杀虫剂、杀菌剂等农药的使用,对环境的影响比传统的方式更小,有利于长期维持稳定的产出。在轮作系统中包含多种作物时,玉米产量比其连续种植时更稳定:Varvel<sup>[29]</sup>发现多作物轮作相对单作能更有效的降低产量的变动。在明尼苏达州通过一个7年的评估发现,玉米的产量无论是在简单轮作(玉米-大豆)还是复杂轮作(玉米-大豆-燕麦-苜蓿)中受到的影响都更小<sup>[30]</sup>;在豆类绿肥绿肥-春玉米-冬小麦轮作方式中,干旱的2012~2013年小麦能获得一个稳定且较高的产量,而对应年份豆类绿肥-冬小麦轮作小麦产量显著降低。其原因在于种植玉米,在后季小麦播前土壤储水量更高<sup>[31]</sup>。另外,可能由于小麦与玉米根系吸收养分的主要土层深度不同,种植玉米对小麦主要吸收层影响较小。值得注意的是,虽然玉米播前施用的氮肥是180 kg/hm<sup>2</sup>,高于豆类绿肥-冬小麦轮作小麦播前135 kg/hm<sup>2</sup>的氮肥施用量,但豆类绿肥-冬小麦在小麦播前有绿肥还田,最终两种轮作方式小麦播种时土壤硝态氮含量差异较小,因此产量的差异应该更多的考虑来自土壤水分的差异而不是玉米播前的氮肥施用量和不同的绿肥还田量。

虽然将豆类作物作为绿肥全部还田,由于其较低的C/N,能很好的为随后种植的作物提供氮肥,但是这种措施的经济效益通常不如收获豆类籽粒后将剩余部分还田。Sharama等<sup>[8]</sup>比较了在春季玉米-冬小麦轮作开始前种植豇豆、绿豆和田菁3种豆科作物的效果后发现,虽然田菁作为绿肥全部还田提供的氮素最多,进而能大量减少肥料氮用量,提升玉米和小麦产量,但是轮作最终的收入还是比不上在春季种植豇豆和绿豆,然后收获籽粒,将茎秆还田。Chen等<sup>[7]</sup>同样发现,在小麦连作体系中引入小扁豆能增加小麦产量而提高收入,但是先收获小扁豆籽粒并将剩余部分还田的经济效益比只将其作为绿肥更高。因此,虽然在本试验中难以对豆类绿肥-冬小麦和豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作中怀豆的不同处理对经济效益的影响进行评估,但是根据这些试验结果可以明确,怀豆收获籽粒应该比只将其作为绿肥更合理。仅从总体收入来看,在4年时间里,豆类绿肥-春玉米-冬小麦各处理的纯收入在21133~27340 yuan/hm<sup>2</sup>之间,变异系数为15.42%;夏休

闲-冬小麦纯收入在6531~11795 yuan/hm<sup>2</sup>,变异系数为49.53%;豆类绿肥-冬小麦各处理的纯收入在1699~9127 yuan/hm<sup>2</sup>之间,变异系数达到了67.69%(图5),表明这种轮作方式的收入受不同的年份之间环境因素的影响而有很大波动。较低的收入变异系数表明,豆类绿肥-春玉米-冬小麦在不同的年份能够确保收入的稳定性,原因之一是该轮作方式中的3种不同作物生长在不同时期(长武怀豆:7~10月份,玉米4~9月份,小麦10~6月份),覆盖了两年的主要降水期(表1,图1),怀豆和玉米的生长时期和当地的雨热资源同步性较好,产量受到降水的影响相对较小。另外,由于有3种作物可进行收获,分散了不同月份降水变异引起的风险,从而降低了不同时期降水偏少对产量和最终收入可能产生的负面影响,如在2009~2011年,怀豆生长的7~10月降水较少,导致其收入偏低(占总收入的7%~8%),但是玉米生长季降水较高,获得了较高收入(占总收入的70%左右)(图3);而在2011~2013年,虽然玉米收入有所降低(54%~55%),但怀豆(16%~17%)和小麦(28%~30%)收入较高(图4),总体收入依然能维持在一个稳定的水平。

## 4 结论

豆类绿肥-冬小麦轮作模式下,不同绿肥翻压时间随试验年限增加对产量的影响不显著。因为该轮作模式总成本较高和作物产量较低,其经济效益低于夏休闲-冬小麦;且纯收入变异系数大,难以被广泛接受。

豆类绿肥-春玉米-冬小麦轮作总成本居中,其中玉米产量高,怀豆售价高,都有利于提高收入;豆类绿肥茎秆翻压和茎秆覆盖可显著提高作物产量和经济效益,且怀豆与玉米生育期和当地降水吻合较好,产出稳定。因此这种轮作不仅能获得高收入,而且收入变异系数小,能更好的保障当地农民收入。

### 参考文献:

- [1] Farahani H J, Peterson G A, Westfall D G. Dryland cropping intensification: A fundamental solution to efficient use of precipitation [J]. *Advances in Agronomy*, 1998, 64:197-223.
- [2] Nielsen D C, Vigil M F. Precipitation storage efficiency during fallow in wheat-fallow systems [J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102: 537-543.
- [3] Li S X, Xiao L. Distribution and management of drylands in the People's Republic of China [J]. *Advances in Soil Science*, 1992, 18: 147-302.
- [4] 李立群, 薛少平, 王虎全, 等. 渭北高原旱地春玉米不同种植模式水温效应及增产效益研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(1): 33-38.



- Li L Q, Xue S P, Wang H Q, *et al.* Effects of different planting patterns on soil moisture, temperature and yield of spring maize on Weibei plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(1): 33–38.
- [5] 李娟, 李军, 尚金霞, 等. 轮耕对渭北旱塬春玉米田土壤理化性状和产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 20(7): 867–873.  
Li J, Li J, Shang J X, *et al.* Effects of rotational tillage on soil physiochemical properties and spring maize yield in Weibei Highlands [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(7): 867–873.
- [6] Saseendran S A, Nielsen D C, Ahuja L R, *et al.* Simulated yield and profitability of five potential crops for intensifying the dryland wheat-fallow production system [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 175–192.
- [7] Chen C, Neill K, Burgess M, *et al.* Agronomic benefit and economic potential of introducing fall-seeded pea and lentil into conventional wheat-based crop rotations [J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(2): 215–224.
- [8] Sharama A R, Behera U K. Nitrogen contribution through Sesbania green manure and dual-purpose legumes in maize-wheat cropping system; agronomic and economic considerations [J]. *Plant and Soil*, 2009, 325: 289–304.
- [9] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 等. 夏闲期种植翻压绿肥和施氮量对冬小麦生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(12): 41–47.  
Zhao N, Zhao H B, Yu C W, *et al.* Effect of green manure in summer fallow period and nitrogen rate on winter wheat growth [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(12): 41–47.
- [10] Francis, C A, Clegg M D. Crop rotations in sustainable production systems [A]. Edwards C A, Lal R, Madden P, *et al.* Sustainable agricultural systems [M]. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society, 1990. 107–122.
- [11] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 等. 渭北旱塬农户冬小麦养分资源投入调查与分析[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(1): 146–145.  
Zhao H B, Wang Z H, Gao Y J, *et al.* Survey analysis on nutrients resource inputting in winter wheat in Weibei dryland area [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(1): 146–150.
- [12] MacWilliam S, Wismer M, Kulshreshtha S. Life cycle and economic assessment of Western Canadian pulse systems: The inclusion of pulses in crop rotations [J]. *Agricultural Systems*, 2014, 123: 43–53.
- [13] 张达斌, 李婧, 姚鹏伟, 等. 夏闲期连续两年种植并翻压豆科绿肥对旱地冬小麦生长和养分吸收的影响[J]. *西北农业学报*, 2012, 21(1): 59–65.  
Zhang D B, Li J, Yao P W, *et al.* Effects of two years incorporation of leguminous green manure during summer fallow period on winter wheat growth and nutrients uptake in dryland [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(1): 59–65.
- [14] Arcand M M, Knight J D, Farrell R E. Estimating belowground nitrogen inputs of pea and canola and their contribution to soil inorganic N pools using <sup>15</sup>N labeling [J]. *Plant and Soil*, 2013, 371: 67–80.
- [15] Stanger T F, Lauer J G, Chavas J P. The profitability and risk of long-term cropping systems featuring different rotations and nitrogen rates [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 105–113.
- [16] Nafziger E D, Dunker R E. Soil organic carbon trends over 10 years in the Morrow Plots [J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103: 261–267.
- [17] Grover K K, Karsten H D, Roth G W. Corn grain yields and yield stability in four long-term cropping systems. *Agronomy Journal*, 2009, 101: 940–946.
- [18] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 不同轮作方式对退化苜蓿草地水分影响及产量效益比较研究[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(10): 70–77.
- Liu P S, Jia Z K, Li J, *et al.* Comparative study on soil water restoring effects and crop yields benefit of different alfalfa-crops rotation patterns on the degenerated alfalfa grassland [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(10): 70–77.
- [19] Gregory M M, Shea K L, Bakko E B. Comparing agro ecosystems; Effects of cropping and tillage patterns on soil, water, energy use and productivity [J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2005, 20(2): 81–90.
- [20] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices [J]. *Nature*, 2002, 418: 671–677.
- [21] Miller P R, Gan Y, McConkey B G, *et al.* Pulse crops for the northern Great Plains: I. Grain productivity and residual effects on soil water and nitrogen [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 972–979.
- [22] 王玉琴. 关于轮作的探讨[J]. *现代农业科技*, 2010, 2: 108.  
Wang Y Q. The discussion about rotation [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012, 2: 108.
- [23] Hanson J D, Liebig M A, Merrill S D, *et al.* Dynamic cropping systems [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 99: 939–943.
- [24] Walley F L, Clayton G W, Miller P R, *et al.* Nitrogen economy of pulse crop production in the Northern Great Plains [J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99: 1710–1718.
- [25] Cardina J, Herms C P, Doohan D J. Crop rotation and tillage system effects on weed seed banks [J]. *Weed Science*, 2002, 50: 448–460.
- [26] Krupinsky J M, Bailey K L, McMullen M P, *et al.* Managing plant disease risk in diversified cropping systems [J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 198–209.
- [27] Kirkegaard J, Christen O, Krupinsky J, *et al.* Break crop benefits in temperate wheat production [J]. *Field Crops Research*, 2008, 107: 185–195.
- [28] McNeill A M, Fillery I R P. Field measurement of lupin belowground nitrogen accumulation and recovery in the subsequent cereal-soil system in a semi-arid Mediterranean type climate [J]. *Plant and Soil*, 2008, 302: 297–316.
- [29] Varvel G E. Monoculture and rotation system effects on precipitation use efficiency of corn [J]. *Agronomy Journal*, 1994, 86: 204–208.
- [30] Porter P M, Huggins D R, Perillo C A, *et al.* Organic and other management strategies with two-and four-year crop rotations in Minnesota [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 233–244.
- [31] 姚致远, 王峥, 李婧, 等. 轮作及绿肥不同利用方式对作物产量和土壤肥力的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2329–2336.  
Yao Z Y, Wang Z, Li J, *et al.* Effects of rotations and different green manure utilizations on crop yield and soil fertility [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2329–2336.