

农田粮—菜轮作体系的生产效益与土壤养分特征

郝旺林¹, 梁银丽^{1,2}, 朱艳丽¹, 吴兴³, 林兴军², 罗安荣¹

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为关中平原地区探索、选择优化合理的农田轮作组合, 在“商品经济”背景下以提高农民收入为目的的农业结构与作物布局调整提供参考。依据系统的田间定位试验数据, 对关中平原常见的粮食作物小麦、玉米和蔬菜作物大蒜、辣椒、茄子、芹菜组成的不同轮作体系的经济产值、土地当量比、生物产量、经济系数、农田土壤环境效应进行了分析。结果表明: (1) 就经济效益和土地产出效率而言, 小麦和玉米组成的粮—粮轮作体系经济效益和土地产出效率是 7 种轮作体系中最低的, 而由大蒜和辣椒、茄子、芹菜组成的蔬菜—蔬菜体系效益和土地产出效率最佳。(2) 从生态学角度分析, 大蒜和辣椒、茄子、芹菜组成的各个蔬菜—蔬菜体系生物产量较高, 其次是小麦和玉米组成的粮—粮轮作体系, 小麦和辣椒、茄子、芹菜组成的各个粮食—蔬菜体系生物产量较低。蔬菜—蔬菜轮作体系的有机物向人类所需品的转化率相对较高, 其次是粮食—蔬菜轮作体系, 小麦玉米粮—粮轮作体系转化率相对较低。(3) 从土壤环境效应角度分析, 基础养分基本表现为蔬菜—粮食轮作体系高于蔬菜—蔬菜轮作体系, 传统的粮食轮作体系相对最低。各轮作体系的土壤呼吸速率, 除了大蒜—辣椒体系较大之外, 其余均表现为粮食—蔬菜轮作体系高于蔬菜—蔬菜轮作体系和粮食轮作体系。依据不同角度对几种轮作体系的生产效益、土壤环境效应的评估以及对关中平原地理、经济环境实际状况的调查, 粮食—蔬菜轮作模式适宜引入大田轮作生产。就本研究的几种粮食—蔬菜轮作模式而言, 小麦—辣椒轮作和小麦—茄子轮作模式有较好的种植前景。

关键词: 粮—菜轮作体系; 生产效益; 环境效应; 定位试验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0046-06

中图分类号: S344.13, S344.15

Production Efficiency and Soil Nutrient Characteristics in Food—Vegetable Rotation Systems

HAO Wang-lin¹, LIANG Yin-li^{1,2}, ZHU Yan-li¹, WU Xing¹, LIN Xing-jun², LUO An-rong¹

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to provide references for adjustments of agricultural structures and crop arrangements, which aim to improve farmers' income within a commodity economy, optimal combinations of crop rotation are needed for agricultural development in Guanzhong plain. According to field test data, the economic value, land equivalent ratio(LRE), biological yield, economic coefficient and the effects of rotation on soil nutrients were analyzed in different rotation systems. The crops tested included food crops of wheat(*Triticum aestivum*) and corn(*Zea mays*), and vegetables of garlic(*Allium sativum*), pepper(*Capsicum*), eggplant(*Solanum melongena*) and celery(*Apium graveolens*), which are commonly found in the plain. The results show that the terms of economic benefits and land production efficiency, the rotation system of wheat—maize was the worst one while the vegetables—vegetable rotation systems of garlic—pepper, garlic—eggplant, garlic—celery were the superior ones. From the ecological point of view focusing on biological yield and net

收稿日期: 2010-08-31

修回日期: 2010-09-08

资助项目: 中国科学院重要方向项目“不同退耕还林草措施对生态系统碳循环的影响方式及程度”(KZCX2-YW-443-3); 中国科学院西部行动项目(KZCX2-XB2-05-01)

作者简介: 郝旺林(1984—), 男(汉族), 山西省忻州市人, 硕士研究生, 主要从事农业生态及作物生理生态研究。E-mail: haowang2000@163.com。

通信作者: 梁银丽(1957—), 女(汉族), 陕西省咸阳市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业生态及作物生理生态研究。E-mail: liangyl@ms.iswc.ac.cn。

organic yield, the value of wheat—maize was lower than the values of the vegetable—vegetable systems of garlic—pepper, garlic—eggplant, and garlic—celery, and was higher than the values of the crop—vegetable systems of wheat—pepper, wheat—eggplant, and wheat—celery. In the terms of effects on soil available nutrients and soil respiration rates, the crop—vegetable systems were better than the vegetable—vegetable rotation systems and the traditional crop rotation systems. Considering the values, geographic conditions and economic environments, the crop—vegetable rotation systems were suitable for the plain. As for the trials of this study, the rotation modes of wheat—pepper and wheat—eggplant were promising with a comprehensive consideration.

Keywords: food—vegetable rotation system; production efficiency; effects on soil nutrient; location test

轮作是在同一块土地上不同年际之间有顺序地轮换种植不同种类作物或者轮换使用不同种植模式的种植方式。轮作是农业精细耕作生产技术之一,长期以来用于维持地力与作物稳产高产^[1]。关中平原也称渭河平原,由于其适宜的地理和气候条件,形成了一年两熟的轮作种植模式,如何安排合理的轮作制度是获得最优生态效益与经济效益的重要措施。

鉴于轮作生产研究的重要性和必要性,轮作生产的研究涉及到不同粮食作物轮作、蔬菜作物轮作、经济作物轮作的研究^[2-9]以及不同种植模式轮作^[10-12]。目前,轮作研究主要集中在轮作系统养分的运移^[13-15],轮作系统的土壤理化特性和水分特性^[16-17],轮作系统的肥料效应^[18],而对轮作模式的研究也主要是粮经轮作,水旱轮作以及设施农业蔬菜轮作等。大田环境下的轮作模式主要是粮食作物的轮作生产模式,近年来,为了进一步改善农田种植环境,提高轮作的经济效益,开始探索新的粮—菜轮作模式。本研究主要通过通过对关中平原大田生产下的传统粮食—粮食轮作体系与新型组合粮食—蔬菜轮作体系、蔬菜—蔬菜轮作体系的经济产量、经济效益、经济系数、系统土地当量比、土壤肥力及土壤呼吸特征等因素的比较,从而选择优化组合,为关中平原农田轮作探索性研究提供科学依据,研究结果对“商品经济”背景下以提高农民收入为目的的农业结构与作物布局调整具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

本试验于 2008 年 9 月至 2009 年 10 月在陕西省杨凌示范区水土保持研究所试验场进行。试验场位于渭河流域关中平原腹地,海拔 403.2~530.1 m,平均气温 12.9 °C,年降水约 660 mm,属大陆性暖温带季风气候,一年两熟。试验地土壤类型为黑垆土,肥力中等,肥力状况为有机质含量 15.4 g/kg,土壤全氮 0.78 g/kg,碱解氮 0.54 g/kg,全磷为 0.7 g/kg,速效磷 27.2 mg/kg,pH 值为 8.2。

1.2 试验设计

本试验设计 7 个不同的轮作体系:小麦(*Triticum aestivum*)—玉米(*Zea mays*)轮作(WM);小麦—茄子(*Solanum melongena*)轮作(WE);小麦—辣椒(*Capsicum*)轮作(WP);小麦—芹菜(*Apium graveolens*)轮作(WC);大蒜(*Allium sativum*)—芹菜轮作(GC);大蒜—辣椒轮作(GP);大蒜—茄子轮作(GE),各处理 3 次重复。7 种不同轮作系统的小区面积为 2.4 m×6.0 m=14.4 m²。前茬作物大蒜和小麦分别于 2008 年 9 月中旬和 10 月上旬种植,辣椒、茄子和芹菜于 2009 年 5 月 28 日移栽,玉米于 2009 年 6 月 3 日种植。小麦的种植方式为传统的条播,行距为 25 cm;大蒜种植密度为 5 cm×20 cm;辣椒移栽(双苗)密度为 25 cm×60 cm;茄子移栽密度为 60 cm×60 cm;芹菜移栽密度为 5 cm×30 cm;玉米种植密度为 30 cm×60 cm。每个试验小区在种植前施磷肥 P₂O₅ 125 kg/hm²,氮肥 N 75 kg/hm² 和钾肥 K₂O 75 kg/hm²;磷肥为磷酸二铵,氮肥为尿素,钾肥为农用硫酸钾。每一茬作物的生长前期追施 N 75 kg/hm² 和钾肥 K₂O 75 kg/hm²,生长中期追 N 肥 75 kg/hm² 和钾肥 K₂O 75 kg/hm²。测量每次的降雨量,根据降雨量来进行灌溉,以保证作物生产的需水量,定期对农田进行人工除草。

1.3 测定项目和方法

(1) 经济产量。粮食作物在成熟期一次性收割,果菜约 12 d 采摘生理成熟度一致果实,叶菜一次性采收。

(2) 生物学产量。粮食作物和叶菜在收获期一次测定其干物质总量。果菜将不同时期收获的果实干物质质量全部计入生物学产量。不同处理各小区取样 3 m² 进行测定。各种植物根系取 5 株,按 30 cm×30 cm 方形挖取深度 60 cm 的土样冲洗。LSR 法进行多重比较。

(3) 土壤化学特性。① 土壤速效养分测定:每小区土样采集选用“S”点多点取样,然后混样、风干。有

机质的测定利用稀释法^[19];速效磷的测定利用 0.5 mol/L⁻¹ NaHCO₃ 法^[19];速效钾的测定利用 NH₄OAc 浸提法,火焰光度法^[19];碱解氮的测定利用碱解氮扩散法^[19]。② 土壤呼吸速率测定。在每小区选取 3 个具有代表性的 3 个观测点,利用美国 Li—Cor 公司生产的 Li-6400-09 土壤呼吸叶室测定土壤呼吸速率。测定前 24 h 将内径为 10.5 cm,高 4.5 cm 的 PVC 环压入土壤 2 cm,压实外圈土壤以防漏气。每小区安放 3 个 PVC 环,之后将 PVC 环长期定位放置。每小区记录 3 个测点数据,于上午 9:00—11:00 进行测定。取 3 个观测点的平均观测值作为小区的土壤呼吸速率 (μmol/(m²·s))。本试验各取前后两茬作物生育前期、中期、末期土壤呼吸速率进行比较。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 产值及效益的分析 产值的计算是通过经济产量与各轮作体系经济部分的市场价格的乘积实现的。各轮作体系的经济产值差异显著性采用 SAS-V8 软件,LSR 法进行多重比较。

土地当量比(land equivalent ratio, LER)^[20-22]是以小麦—玉米这个传统的轮作体系为参照,各个轮作体系相对于小麦—玉米体系的产值比,反映了不同体系的土地产出效率。

1.4.2 经济系数测算 根据肖寒提出的农田耕地净第一性生产力测算模型^[23]

$$Q=B \times (1-R) / f$$

式中:Q——净第一性生产力;B——经济产量;R——经济产量含水率;f——经济系数。

推导得到经济系数测算的模型为:

$$f=B \times (1-R) / Q$$

经济系数表征有机物转化成人们所需产品的能力,经济系数愈大,愈符合人们栽培的目的。由于各轮作体系分别有两种作物,轮作体系各作物的经济系数简单相加或简单的算术平均数不能科学表达轮作体系的整体经济系数。因此,轮作体系整体的经济系数选用了两种作物的调和平均数:

$$f_{km}=n / (1/f_1+1/f_2+\dots+1/f_n)$$

式中: f_{km} —— n 种作物的调和经济系数平均数,即为轮作体系整体的经济系数。

1.4.3 土壤养分特征 土壤养分特征主要从两方面进行比较,土壤的速效养分(有机质、速效磷、速效钾、碱解氮)和土壤的呼吸速率平均变化差异显著性采用 SAS-V8 软件,LSR 法进行多重比较。

2 结果分析

2.1 不同轮作体系经济产量及效益

复种轮作体系按照一个整合系统来分析,产量是不具有可比性的,可以通过经济效益进行比较。通过对不同轮作体系两种作物的产值比较可以看出(表 1),两种不同的前茬经济产值为:大蒜>小麦;而两种不同前茬下的 3 种蔬菜经济产值表现为:GE 茄子>WE 茄子,GP 辣椒>WP 辣椒,GC 芹菜>WC 芹菜。对各体系进行总体比较,7 个不同轮作体系的经济产值间差异极显著($p < 0.01$)。比较土地当量比可以反映出不同轮作体系的土地产出效率,以小麦—玉米轮作体系作为对照,各轮作体系的土地当量比顺序为:GE>GP>GC>WE>WC>WP>WM。

表 1 各个轮作体系的生物产量、经济产值和土地当量比

| 轮作体系 | 作物 | 生物产量/ (kg·m ⁻²) | 经济产值/ (元·m ⁻²) | 总生物产量/ (kg·m ⁻²) | 总产值/ (元·m ⁻²) | 土地当量比 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|----|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------|----|----|------|-------|-------------------|--------------------|-------|----|------|-------|----|----|------|------|-------------------|--------------------|-------|----|------|-------|----|----|------|------|-------------------|--------------------|------|----|------|-------|----|----|------|------|-------------------|--------------------|------|----|------|-------|----|----|------|------|-------------------|--------------------|------|----|------|-------|----|----|------|------|-------------------|-------------------|
| GE | 大蒜 | 2.64 | 10.15 | 3.55 ^b | 45.13 ^a | 20.15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 茄子 | 0.91 | 34.98 | | | | GP | 大蒜 | 2.63 | 10.03 | 4.22 ^a | 43.63 ^b | 19.48 | 辣椒 | 1.59 | 33.60 | GC | 大蒜 | 2.63 | 9.03 | 3.44 ^c | 42.05 ^c | 18.77 | 芹菜 | 0.81 | 33.02 | WC | 小麦 | 0.56 | 1.15 | 1.14 ^f | 16.87 ^e | 7.53 | 芹菜 | 0.58 | 15.72 | WP | 小麦 | 0.53 | 1.12 | 1.15 ^e | 14.08 ^f | 6.29 | 辣椒 | 0.62 | 12.96 | WE | 小麦 | 0.57 | 1.15 | 1.12 ^g | 21.63 ^d | 9.66 | 茄子 | 0.55 | 20.48 | WM | 小麦 | 0.62 | 1.10 | 1.90 ^d | 2.24 ^g |
| GP | 大蒜 | 2.63 | 10.03 | 4.22 ^a | 43.63 ^b | 19.48 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 辣椒 | 1.59 | 33.60 | | | | GC | 大蒜 | 2.63 | 9.03 | 3.44 ^c | 42.05 ^c | 18.77 | 芹菜 | 0.81 | 33.02 | WC | 小麦 | 0.56 | 1.15 | 1.14 ^f | 16.87 ^e | 7.53 | 芹菜 | 0.58 | 15.72 | WP | 小麦 | 0.53 | 1.12 | 1.15 ^e | 14.08 ^f | 6.29 | 辣椒 | 0.62 | 12.96 | WE | 小麦 | 0.57 | 1.15 | 1.12 ^g | 21.63 ^d | 9.66 | 茄子 | 0.55 | 20.48 | WM | 小麦 | 0.62 | 1.10 | 1.90 ^d | 2.24 ^g | 1.00 | 玉米 | 1.28 | 1.14 | | | | | | |
| GC | 大蒜 | 2.63 | 9.03 | 3.44 ^c | 42.05 ^c | 18.77 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 芹菜 | 0.81 | 33.02 | | | | WC | 小麦 | 0.56 | 1.15 | 1.14 ^f | 16.87 ^e | 7.53 | 芹菜 | 0.58 | 15.72 | WP | 小麦 | 0.53 | 1.12 | 1.15 ^e | 14.08 ^f | 6.29 | 辣椒 | 0.62 | 12.96 | WE | 小麦 | 0.57 | 1.15 | 1.12 ^g | 21.63 ^d | 9.66 | 茄子 | 0.55 | 20.48 | WM | 小麦 | 0.62 | 1.10 | 1.90 ^d | 2.24 ^g | 1.00 | 玉米 | 1.28 | 1.14 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WC | 小麦 | 0.56 | 1.15 | 1.14 ^f | 16.87 ^e | 7.53 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 芹菜 | 0.58 | 15.72 | | | | WP | 小麦 | 0.53 | 1.12 | 1.15 ^e | 14.08 ^f | 6.29 | 辣椒 | 0.62 | 12.96 | WE | 小麦 | 0.57 | 1.15 | 1.12 ^g | 21.63 ^d | 9.66 | 茄子 | 0.55 | 20.48 | WM | 小麦 | 0.62 | 1.10 | 1.90 ^d | 2.24 ^g | 1.00 | 玉米 | 1.28 | 1.14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WP | 小麦 | 0.53 | 1.12 | 1.15 ^e | 14.08 ^f | 6.29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 辣椒 | 0.62 | 12.96 | | | | WE | 小麦 | 0.57 | 1.15 | 1.12 ^g | 21.63 ^d | 9.66 | 茄子 | 0.55 | 20.48 | WM | 小麦 | 0.62 | 1.10 | 1.90 ^d | 2.24 ^g | 1.00 | 玉米 | 1.28 | 1.14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WE | 小麦 | 0.57 | 1.15 | 1.12 ^g | 21.63 ^d | 9.66 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 茄子 | 0.55 | 20.48 | | | | WM | 小麦 | 0.62 | 1.10 | 1.90 ^d | 2.24 ^g | 1.00 | 玉米 | 1.28 | 1.14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WM | 小麦 | 0.62 | 1.10 | 1.90 ^d | 2.24 ^g | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 玉米 | 1.28 | 1.14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

注:同列数据后标的不同字母表示在 1%水平上差异极显著。下同。

从开始收获到最后拔苗,不同前茬的辣椒经济部分的产量纵向看基本呈先递增后逐渐递减的趋势(图 1),而横向进行比较,以大蒜为前茬的辣椒的经济部分产量在各个采摘期均明显高于前茬为小麦的辣椒的产量。从图 2 可以看出,茄子的动态产量变化规律并不明显,但总体分析可知,前茬为大蒜的茄子产量高于前茬为小麦的茄子产量。以大蒜为前茬的芹菜产量 13.82 kg/m²,以小麦为前茬的芹菜产量为 6.56 kg/m²,明显低于前茬为大蒜的芹菜的产量。单纯地对粮食—蔬菜体系和蔬菜—蔬菜轮作体系中后茬蔬菜作物的产量比较,大蒜茬蔬菜产量明显优于小麦茬。

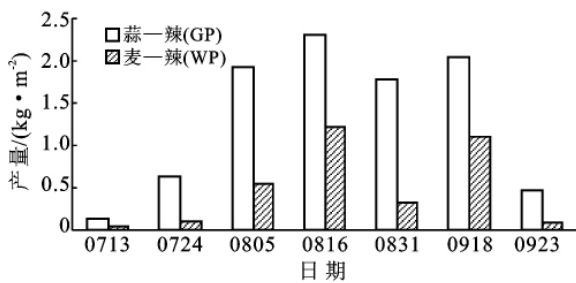


图 1 2009 年不同前茬辣椒的动态产量

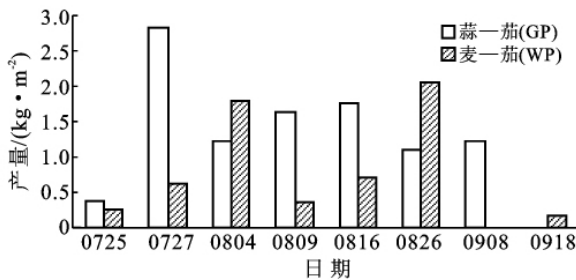


图 2 2009 年不同前茬茄子的动态产量

2.2 各轮作体系的生物学产量

以大蒜为前茬的轮作体系生物产量大于以小麦为前茬的轮作体系生物产量(表 1),同种后茬作物横向比较生物量:GE 茄子>WE 茄子;GP 辣椒>WP 辣椒;GC 芹菜>WC 芹菜;同一前茬不同蔬菜生物量:GP 辣椒>GE 茄子>GC 芹菜,WP 辣椒>WE 茄子>WC 芹菜,不同轮作体系间的生物量差异极显著($p<0.01$)。总生物量:GP>GE>GC>WM>WP>WC>WE,说明粮食—粮食轮作体系和蔬菜—蔬菜轮作体系生物产量高于粮食—蔬菜轮作体系。

对不同前茬的同种后茬蔬菜作物的各器官干物质比例进行分析(表 2),从表中果实比例来看,大蒜前茬的辣椒果占总干物质 86%,小麦前茬的辣椒果占 64%;同样,大蒜前茬的茄子果占总干物质 81%,而小麦前茬的茄子果占 75%;这表明大蒜茬的果菜生产优于小麦茬的果菜生产。从表 2 可知,大蒜前茬的芹菜

茎叶比为 74%,而小麦前茬的芹菜茎叶比为 86%,与前两种蔬菜不同,小麦前茬的芹菜经济部分干物质比重高于大蒜前茬的经济部分干物质比,这表明小麦茬的茎叶菜部分的比重要高于大蒜茬。

表 2 不同前茬蔬菜各器官干物质的比重 %

| 蔬菜类别 | 茎比重 | 叶比重 | 果比重 | 根比重 |
|---------|-----|-----|-----|-----|
| 辣椒(大蒜茬) | 8 | 4 | 86 | 2 |
| 辣椒(小麦茬) | 18 | 11 | 64 | 7 |
| 茄子(大蒜茬) | 8 | 6 | 81 | 5 |
| 茄子(小麦茬) | 12 | 6 | 75 | 7 |
| 芹菜(大蒜茬) | 29 | 26 | — | 45 |
| 芹菜(小麦茬) | 24 | 14 | — | 62 |

2.3 各轮作体系的经济系数

不同轮作体系经济系数表现为:GP>GE>WP>WE>GC>WC>WM(表 3),3 种不同的蔬菜—蔬菜轮作体系的平均经济系数较高,3 种不同的粮食—蔬菜的平均经济系数次之,传统的小麦—玉米系统相对最低。因此,蔬菜—蔬菜轮作体系和粮食—蔬菜体系比传统粮食轮作体系的小麦—玉米系统更容易产生较高的经济效益。

表 3 不同轮作体系的经济系数

| 轮作体系 | 作物 | 经济产量/(kg·m ⁻²) | 经济产量含水率/% | 经济系数 | 平均经济系数 |
|------|----|----------------------------|-----------|------|--------|
| GE | 大蒜 | 1.45 | 16.50 | 0.45 | 0.58 |
| | 茄子 | 10.93 | 93.28 | 0.81 | |
| GP | 大蒜 | 1.43 | 16.20 | 0.46 | 0.60 |
| | 辣椒 | 9.33 | 85.36 | 0.86 | |
| GC | 大蒜 | 1.29 | 14.32 | 0.42 | 0.47 |
| | 芹菜 | 13.76 | 96.82 | 0.54 | |
| WC | 小麦 | 0.64 | 61.92 | 0.44 | 0.41 |
| | 芹菜 | 6.55 | 96.65 | 0.38 | |
| WP | 小麦 | 0.62 | 60.75 | 0.45 | 0.53 |
| | 辣椒 | 3.60 | 88.86 | 0.64 | |
| WE | 小麦 | 0.64 | 60.85 | 0.44 | 0.55 |
| | 茄子 | 6.40 | 93.42 | 0.75 | |
| WM | 小麦 | 0.61 | 57.53 | 0.42 | 0.38 |
| | 玉米 | 0.60 | 16.00 | 0.35 | |

2.4 各轮作体系的土壤环境效应

大蒜茬蔬菜作物的有机质含量较传统的粮食轮作体系小麦—玉米的差异性显著(表 4),而小麦茬的蔬菜作物的总体表现为:GC>WC>GP>WP>WE>GE>WM。各轮作体系的速效磷含量、速效钾含量和碱解氮含量均存在显著差异性,分别表现为:GC>WC>GP>WP>WE>GE>WM,GC>WE>WC>WP>WM>GE>GP 和 GC>GP>GE>WC>WP

>WE>WM。对速效养分数据进行综合比较可知,在同等条件下,传统的粮食轮作体系对土壤肥力的保持和维护能力相对于粮菜轮作体系和菜—菜轮作体系较弱。对各轮作体系肥力保持能力进行分析可知,大蒜—芹菜体系明显优于小麦玉米体系。

表 4 不同轮作体系的速效养分含量

| 轮作体系 | 作物 | 有机质/ (g·kg ⁻¹) | 速效磷/ (mg·kg ⁻¹) | 速效钾/ (mg·kg ⁻¹) | 碱解氮/ (mg·kg ⁻¹) |
|------|----------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| GE | 大蒜 茄子 | 16.30 | 8.40 ^d | 142.71 ^{de} | 41.99 ^{ab} |
| GP | 大蒜 辣椒 | 19.43 ^{ab} | 12.59 ^{bc} | 135.23 ^f | 42.97 ^a |
| GC | 大蒜 芹菜 | 21.50 ^a | 22.24 ^a | 179.59 ^a | 47.44 ^a |
| WC | 小麦 芹菜 | 20.33 ^a | 16.81 ^b | 157.03 ^c | 36.08 ^{bc} |
| WP | 小麦 辣椒 | 17.36 ^{bc} | 12.23 ^c | 149.43 ^{cd} | 34.20 ^c |
| WE | 小麦 茄子 | 16.59 ^c | 9.28 ^d | 165.36 ^b | 32.36 ^{cd} |
| WM | 小麦 玉米 | 15.95 ^c | 4.16 ^e | 146.60 ^d | 26.08 ^d |

由表 5 可以看出,各轮作体系的土壤呼吸平均速率总体表现为:WP>WC>WE>GE>GP>GC>WE。但是,分析各轮作体系前后两茬作物在不同生长期,生长前期和末期各体系的土壤呼吸速率差异并不显著。生长中期各体系的呼吸速率差异显著,蔬菜—蔬菜轮作体系表现出较高的呼吸率,而粮食—蔬菜轮作体系和粮食轮作体系呼吸相对较弱。土壤呼吸速率表征了土壤中微生物、动物、土壤中作物根系的呼吸活动和含碳矿物质的化学氧化作用的强弱,土壤呼吸释放 CO₂ 是引起温室效应的一个重要方面。对各个轮作体系比较可知,蔬菜—蔬菜轮作体对温室效应的贡献率较大,而粮食—蔬菜轮作体系和粮食轮作体系对温室效应的相对贡献率最小。

2.5 讨论

(1) 粮菜轮作向农田轮作的体系的引入加强了农田的综合生产能力。宋晨生等^[24]将小麦、玉米、冬瓜、菠菜、芹菜进行一年五作的立体轮作整合,在保证粮食生产的同时,增加了蔬菜种植面积,边行优势明显,提高了复种指数,充分利用了光热资源,经济效益也大幅度增加。本研究中对关中平原常见的几种蔬菜和粮食作物进行轮作整合,其结果显示蔬菜—粮食轮作系统土地利用效率、产品产出能力、以及经济效益较传统的粮食轮作体系和单纯的蔬菜—蔬菜有了很大的提高,生产优势比较明显。

表 5 不同轮作体系的土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

| 轮作体系 | 作物 | 前茬作物 | | | 后茬作物 | | |
|------|----------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | | 前期 | 中期 | 末期 | 前期 | 中期 | 末期 |
| GE | 大蒜 茄子 | 1.81 ^b | 1.26 ^a | 1.01 ^{ab} | 2.99 ^b | 3.61 ^c | 4.17 ^b |
| GP | 大蒜 辣椒 | 1.96 ^b | 1.28 ^a | 0.82 ^b | 2.80 ^b | 6.37 ^a | 7.05 ^a |
| GC | 大蒜 芹菜 | 1.78 ^b | 0.52 ^{cd} | 0.89 ^{ab} | 3.03 ^b | 4.11 ^{bc} | 3.79 ^b |
| WC | 小麦 芹菜 | 2.91 ^a | 0.39 ^d | 1.09 ^{ab} | 4.24 ^a | 4.21 ^{bc} | 3.14 ^b |
| WP | 小麦 辣椒 | 2.20 ^b | 0.56 ^{cd} | 1.21 ^a | 3.24 ^b | 4.85 ^b | 3.99 ^b |
| WE | 小麦 茄子 | 1.86 ^b | 0.68 ^{bc} | 1.10 ^{ab} | 3.42 ^{ab} | 4.45 ^{bc} | 3.67 ^b |
| WM | 小麦 玉米 | 1.75 ^b | 0.82 ^b | 0.99 ^{ab} | 4.24 ^a | 3.86 ^c | 2.15 ^b |

(2) 合理的农田轮作整合也将极大改善土壤的养分特征。刘文辉等^[25]等研究认为蔬菜的种植有利于提高土壤根层速效养分,同时有利于根层微量元素向上分布。

本研究显示蔬菜—粮食轮作体系的速效养分比蔬菜—蔬菜和传统的粮食轮作体系含量高,有助于地力的保持,进一步提高农田的生产效益。土壤呼吸速率是表征土壤中微生物、动物、土壤中作物根系的呼吸活动和含碳矿物质的化学氧化作用的强弱,本研究中土壤呼吸速率粮食—蔬菜轮作体系均大于蔬菜—蔬菜轮作体系和粮食轮作体系。

(3) 要对轮作体系合理的评价,指导生产实践,需对当地的种植环境和经济环境进行综合分析。关中平原是重要的麦产区,小麦播种面积占到粮播面积的 50%。随着人民生活水平提高,对蔬菜的需求量也大幅度提高。在这种条件下,传统的粮食—粮食轮作模式已不能适应现在的经济发展水平,大田轮作生产模式应该进行探索性改变,灌区的粮食—蔬菜的轮作模式可以代替设施农业,以低成本高效益进行生产,这种模式也符合粮食安全和宏观农业区划的要求。同时,粮食—蔬菜的轮作模式有利于提高土壤肥力,减小土壤呼吸向空气中排放温室气体。根据本试验的测算,蔬菜—蔬菜轮作生产模式虽然经济获益最大,但生产投入也较大,同时这样单一的种植模式在重要的麦产区进行推广对区域粮食安全问题也有影响,不符合农业区划的基本原则。所以,粮食—蔬菜轮作是关中平原比较科学的生产模式,就本研究中几种不同的粮食—蔬菜轮作体系的生产效益和土壤环境效应而言,小麦—辣椒轮作体系和小麦—茄子轮作

体系相对于小麦—芹菜有较好的种植前景。对于蔬菜—粮食轮作体系的其它优势有必要进一步探索研究,同时,由于轮作体系优越性的研究是一个长期性的工作,需要持续完整、全面地进行。

3 结论

(1) 从经济效益和土地利用效率角度分析,本研究中各轮作体系经济产值和作体产值当量比以大蒜—茄子轮作体系最高,依次为大蒜—辣椒、大蒜—芹菜、小麦—茄子、小麦—芹菜、小麦—辣椒体系,传统小麦—玉米体系的经济产值和轮作当量比最低。

(2) 从生态学角度分析,大蒜—辣椒轮作生物量最高,依次是大蒜—茄子、大蒜—芹菜、小麦—玉米、小麦—辣椒、小麦—芹菜,而小麦—茄子体系的生物量最低。而表征有机物转化成人们所需要产品能力的经济系数比较,大蒜—辣椒体系转化最多,其次是大蒜—茄子、小麦—辣椒、大蒜—芹菜、小麦—茄子、小麦—芹菜,转化最低的为小麦—玉米体系。按照有机物转化率来决定栽培模式,较好的是菜—菜轮作体系,粮食—蔬菜轮作体系次之,最后是粮—粮轮作体系。

(3) 综合比较不同轮作体系的土壤速效养分,大蒜—芹菜体系土壤速效养分最高,依次为蔬菜—粮食轮作、蔬菜—蔬菜轮作、传统的粮食轮作体系。各轮作体系的土壤呼吸速率由高到低依次表现为:粮食—蔬菜轮作>蔬菜—蔬菜轮作>粮食轮作体系。

[参 考 文 献]

[1] 王立祥,李军. 农作学[M]. 北京:科学出版社,2003:182-183.

[2] 毕冬梅,张仁陟. 不同耕作措施对麦—豆轮作条件下土壤有机碳库与微生物商的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(6):11-16.

[3] 盛婧,陈留根,朱普平. 稻麦轮作农田生态系统服务功能价值评估[J]. 中国生态农业学报,2008,16(6):1541-1545.

[4] 晏娟,尹斌,张绍林,等. 太湖地区稻麦轮作系统中氮肥效应的研究[J]. 南京农业大学学报,2009,32(1):61-66.

[5] Ofori F, Stem W R. Cereal-Legume intercropping systems [J]. Adv. Agron., 1987, 41: 41-90.

[6] Michael E S, Michael A D, Eric P W. Enterprise cost assignment and land tenure implications in crop rotation systems; A rice/crawfish rotation case study[J]. Journal of the Asmara., 2009,72(1):43-49.

[7] Gao L, Liu H M. Rotation system for Cardamom planting and forest regeneration in the tropical rainforest of southwest China [J]. Journal of Tropical Forest Sci-

ence, 2009, 21(3): 190-197.

[8] Pala M, Ryan J, Diekmann J, et al. Barley and vetch yields from dry land rotations with varying tillage and residue management under mediterranean conditions [J]. Expl. Agric., 2008, 44: 559-570.

[9] Sachiko Ikenaga, Tatsuya Inamura. Evaluation of site-specific management zones on a farm with 124 contiguous small paddyfields in a multiple-cropping system [J]. Precision Agric., 2008, 10: 147-159.

[10] 何圣米,杨悦俭,李必元,等. 设施蔬菜—水生蔬菜水旱轮作模式的应用[J]. 浙江农业科学,2005(1):11-13.

[11] 梁银丽,由海霞,陈志杰,等. 设施农业不同种植模式系统生产力与土壤生物特性研究[J]. 水土保持学报,2006,20(4):163-165.

[12] 陈可可. 越冬番茄—稻、瓜菜高效双熟制轮作模式[J]. 栽培技术,2009(23):23-24.

[13] 陈义,吴春艳,唐旭,等. 稻—麦轮作体系中有有机氮与无机氮的去向研究[J]. 中国农业科学,2010,43(4):744-752.

[14] 陆敏,茅国芳,向圣兰,等. 稻麦轮作过程氮氮径流特征和数值模拟研究[J]. 上海农业学报,2009,25(1):43-47.

[15] 杨蓓蓓,刘敏,张丽佳,等. 稻麦轮作农田系统中磷素流失研究[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,2009(6):56-63.

[16] 兰全美,张锡洲,李廷轩. 水旱轮作条件下免耕土壤主要理化特性研究[J]. 水土保持学报,2009,23(1):145-149.

[17] 熊鸿焰,李廷轩,余海英,等. 水旱轮作条件下免耕土壤微生物特性研究[J]. 植物营养与肥料报,2009:15(1):145-150.

[18] 孙克刚,和爱玲,李丙奇,等. 小麦—玉米周年轮作制下的控释肥及控释 BB 肥肥效试验研究[J]. 中国农学通报,2009,25(12):150-154.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2005:25-103.

[20] Willey R W. Intercrop and its importance and research needs, part1: Competition and yield advantages [J]. Field Crop Research, 1979, 32:1-10.

[21] Mead R, Willey R W. The concept of 'Land Equivalent Ratio' and advantages in yields from intercropping [J]. Exp. Agric., 1980, 16:217-228.

[22] 蔡承智,高军,陈阜. 土地当量比(LER)的计算校正探讨[J]. 耕作与栽培,2003(5):19-23.

[23] 肖寒. 区域生态系统服务功能形成机制与评价方法研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心,2001.

[24] 宋晨生,李玉峰,胡蓓立,等. 小麦、菠菜、冬瓜、玉米、芹菜立体栽培技术[J]. 蔬菜,2007(10):14-15.

[25] 刘文辉,武建华,郭永东,等. 保护地蔬菜土壤养分特征研究[J]. 山西农业科学,2007,35(10):65-67.