

长武旱塬不同麦玉轮作系统产量效应模拟研究

王学春¹, 李 军^{1,2*}, 任晶晶¹

(1. 西北农林科技大学农学院, 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)

摘 要: 利用 EPIC 模型对不同麦玉轮作系统进行模拟, 通过对其输出结果的分析, 综合考虑产量、经济效益、干旱胁迫和氮肥生产率等因素, 对不同麦玉轮作系统进行综合评价, 从而比较不同麦玉轮作系统的优劣。结果表明: (1) 在模拟研究期间, 8 种麦玉轮作系统的产量均呈波动性下降趋势, 其平均值分别为 4.61、4.40、4.16、4.48、4.28、4.29、4.71、4.55 t/hm²。所有的麦玉轮作系统中, 麦玉轮作系统“春玉米→冬小麦”的经济效益最好。(2) 在模拟研究期间, 麦玉轮作系统“春玉米→冬小麦→冬小麦”的冬小麦和春玉米所遭受的年均干旱胁迫日数最少(29.51 d)。在干旱年份麦玉轮作系统中的冬小麦较春玉米更容易遭受干旱威胁。综合产量、经济效益、作物所遭受的干旱胁迫天数和麦玉轮作系统的氮肥生产率等因素, 在长武地区适宜采用的麦玉轮作系统为春玉米→冬小麦。

关键词: 轮作; EPIC 模型; 产量; 长武旱塬

中图分类号: S344.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)03-0071-08

在以雨养农业为主的旱塬农业区, 通过建立合理的轮作制度来提高作物对水分和养分的利用, 一直是众多学者倡导的观点^[1-5]。冬小麦和春玉米是黄土高原南部沟壑区旱作农田两大主要粮食作物, 并且两种作物经常进行轮作。确定合理的轮作系统, 对于提高旱塬区粮食作物产量和农民经济效益有着重要的意义。众多学者先后对轮作条件下的土壤水分和养分等进行了充分探讨, 揭示了轮作系统中养分、水分的运移规律, 总结了耕作措施^[6]、水分^[7,8]、养分^[9-19]和微生物^[20,21]等因素对轮作系统作物产量的影响。由于试验条件的限制, 关于不同麦玉轮作系统的比较研究较少。李军^[5]等对黄土高原地区不同轮作系统的产量效应、经济效益分别进行了比较研究。樊廷录^[22]等利用长期定位试验研究了不同肥力水平下的春玉米→春玉米→冬小麦→冬小麦→冬小麦→冬小麦轮作系统的增产效果。随着计算机水平和作物模拟模型不断发展, 许多学者开始采用计算机模拟的方法研究和评价复杂的农业生态系统。Chung 等^[23]2001 年用 EPIC 模拟了连作玉米、玉米大豆轮作和连作苜蓿的产量, 结果表明虽然在部分处理中存在 20%~30% 的误差, 但模型能较精确地反映实际产量。Roloff 等^[24]1998 年对小麦连作、休闲-小麦、休闲-小麦-小麦三种作物系统下小麦产量进行了模拟研究, 结果表明 EPIC 模型能较好地模拟不同轮作系统间作物产量的差异;

Geleta 等^[25]1994 年对不同灌溉系统不同轮作条件下的高粱、冬小麦、玉米产量进行了模拟研究, 结果表明高粱和冬小麦产量都受到土壤类型和灌溉系统的影响, 而玉米的产量不受灌溉系统的影响。李军^[26]、王宗明^[27]、王学春^[8]等在黄土高原地区的模拟验证结果表明, EPIC 模型对黄土高原地区连作冬小麦、连作春玉米和麦玉轮作系统作物产量的模拟结果是可以接受的。本研究采用计算机模拟的方法, 应用 EPIC 模型对不同麦玉轮作系统的产量、干旱胁迫等进行模拟研究, 综合不同麦玉轮作系统的产量、经济效益、干旱胁迫等因素, 对不同麦玉轮作系统进行分析 and 评价, 最终筛选出与当地环境条件相适应的麦玉轮作系统, 为黄土高原南部沟壑区粮食生产的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究方法

采用计算机模拟的方法, 借助环境政策综合气候模型 EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) 以“作物-土壤-环境”综合系统为研究对象, 长时段定量模拟研究长武旱塬地不同麦玉轮作系统的产量波动性与经济效益等, 系统评价黄土高原旱塬地不同麦玉轮作系统的产量变化规律。本研究所涉及的 8 种麦玉轮作系统分别为: 春玉米→冬小麦 (R1), 春玉米→冬小麦→冬小麦 (R2), 春玉米→冬

收稿日期: 2009-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40371077, 30471024)

作者简介: 王学春 (1979—), 男, 山东威海人, 在读博士研究生, 主要从事作物生产系统模拟与决策研究。E-mail: langzi0509@sina.com。

* 通讯作者: 李 军 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事旱区农业生态与高效耕作制度、作物生产系统模拟与决策领域的教学、研究工作。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn。

小麦→冬小麦→冬小麦(R3),春玉米→春玉米→冬小麦(R4),春玉米→春玉米→冬小麦→冬小麦(R5),春玉米→春玉米→冬小麦→冬小麦→冬小麦(R6),春玉米→春玉米→春玉米→冬小麦(R7),春玉米→春玉米→春玉米→冬小麦→冬小麦(R8),两种连作系统为冬小麦连作(CWW)、春玉米连作(CSC),其中CWW、CSC为对照。冬小麦和春玉米的施肥水平分别为N 180 kg/hm²和P 90 kg/hm²、N 240 kg/hm²和P 120 kg/hm²,冬小麦和春玉米的种植密度分别为2 250 000株/hm²、45 000株/hm²,其它管理措施同大田生产。

1.2 WinEPIC 模型简介与模拟设定

EPIC模型是美国建立的定量评价“气候—土壤—作物—管理”综合系统的动力学模型,由气象模拟、侵蚀、营养循环、作物生长、土壤耕作、经济效益和作物环境控制等模块组成,能够以“天”为时间步长,定量模拟作物产量的长周期动态变化过程,可用来评价农田作物生产管理策略的优劣^[28-31]。对作物产量的模拟是EPIC模型的基本功能之一,模型模拟的冬小麦产量和观测值间的相关系数达到了0.90左右^[28],在黄土高原地区的相关研究显示,模型模拟的冬小麦产量和观测值间的相对误差为7.78%^[32]。对玉米的相关研究表明模型模拟的生物量和作物产量是可以接受的^[33]。大部分学者认为模型能够较好地模拟较长时间段内作物产量的平均值^[32,33]。本研究采用WinEPIC 3060版,可以编辑较复杂的轮作系统,并能够逐年输出作物的模拟产量,对旱地作物产量的变化动态模拟较为准确^[34]。

模拟研究中所采用的1957~2001年长武气象数据来源于长武气象站,主要参数包括逐日最高温度,最低温度,降雨量,相对湿度,风速和太阳辐射量。其中太阳辐射量是通过日照时数转换而来的^[35-37]。

土壤数据包括每个剖层的土壤容重、田间饱和持水量、萎蔫系数、沙粒含量、粘粒含量等物理指标,速效氮含量、速效磷含量、碳酸钙含量以及土壤可交换盐离子含量等化学指标。本文在建立土壤数据库的过程中所采用的数据一部分来源于实地观测,一部分来源于陕西土壤^[38]和中国土种志^[39]。本研究所采用的土壤为长武旱地典型土壤——黑垆土,模型模拟的土壤深度设定为7 m,分为10个剖层:0~0.01 m,0.01~0.2 m,0.2~0.5 m,0.5~1.0 m,1.0~2.0 m,2.0~3.0 m,3.0~4.0 m,4.0~5.0 m,5.0~6.0 m,6.0~7.0 m。0~7 m土层的平均田间持水量,萎蔫系数,土壤容重分别为0.27 m/m,0.13

m/m和1.32 g/cm³,平均速效氮为24.0 mg/kg,平均速效磷为3.1 mg/kg。

在管理数据库中,设定冬小麦的种植时间为9月20日,收获时间为次年的6月20日。春玉米的种植时间为4月15日,收获时间为当年的9月15日。施肥时间与当地大田管理相同。另外模型会根据其计算的作物生长情况,自动调整收获和播种时间,但总体上不会与设定日期相差太大,前后相差不超过5 d。

EPIC模型通过作物生长参数控制作物的生长发育阶段和产量形成过程,估算温度、水分、养分等环境因素对生物量积累和经济产量形成的胁迫程度,从而根据作物的生物量和作物所遭受的胁迫程度等估算作物的产量^[40]。本研究依据相关文献^[8]和实地测量结果,对长武站冬小麦和春玉米的潜在能量转换比率、生长最适温度、生长发育最低温度、最大叶面积系数等生理生态参数进行了设定(表1)。

2 结果与分析

2.1 不同麦玉轮作系统冬小麦和春玉米的产量

在模拟研究期间,冬小麦和春玉米产量平均值表现为:随着玉米种植比例的增加,产量平均值增加,波动范围增大。单从冬小麦和春玉米平均产量看,在8个麦玉轮作系统和2个连作系统中,CSC平均值最大,其次为R7和R1,CWW最低(表2)。图1表明高产年份多出现在春玉米和降雨较多的年份,而低产年份多出现在冬小麦和降雨较少的年份。在41年中,1995年为特旱年份,R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8在该年的作物和产量分别为冬小麦0.27 t/hm²、冬小麦0.24 t/hm²、冬小麦0.24 t/hm²、冬小麦0.29 t/hm²、冬小麦0.23 t/hm²、春玉米1.71 t/hm²、冬小麦0.29 t/hm²、春玉米1.71 t/hm²,冬小麦产量明显低于春玉米。

为评价不同麦玉轮作系统的茬口增产效果,本文以连作冬小麦和连作春玉米为参照,对不同麦玉轮作系统的茬口增产效果进行了评价。茬口增产效果即轮作系统中的某种作物相对同一年份中该作物在连作系统中的产量增加率,用公式表示为 $E = (Y_1 - Y_0)/Y_0$,公式中 E 表示茬口增产效果, Y_1 表示麦玉轮作系统中某种作物的产量, Y_0 为该作物在同一年份的连作系统中的产量。以R2为例:在1963年R2中所种植的春玉米产量为8.378 t/hm²,比CSC中春玉米(1963年)产量9.128 t/hm²降低了0.250 t/hm²,因为R2的肥力水平、作物参数、土壤参

数、气象参数等均和 CSC 相同,只有作物茬口不同,因此 $-0.250/9.128 = -0.082$ 即为 R2 的茬口对春玉米的增产效果;同样可以计算出 1964 年 R2 中冬小麦相对 CWW 中冬小麦的增产效果为 $(7.291 - 7.216)/7.216 = 0.104$,即 R2 中茬口对冬小麦的增产效果为 0.104;1965 年 R2 中茬口对冬小麦的增产效果为 $(8.229 - 7.46)/7.46 = 0.103$ 。按照同样的方法对所有轮作系统的茬口增产效果进行计算得到 R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8 的茬口增产效果多年平均值分别为 0.03、0.16、0.14、0.06、0.06、0.14、-0.02、0.15。从茬口增产效果看,R2 增产效果最

好,其次为 R8,最差的为 R7。
当把玉米和小麦产量分开计算时,春玉米在 R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8 中的产量平均值分别为 5.68、6.03、5.79、4.99、5.01、5.42、4.93、4.85 t/hm²,茬口增产效果平均值分别为 0.04、0.17、0.03、-0.01、-0.04、0.02、-0.06、-0.02,变异系数为 0.28、0.25、0.29、0.40、0.39、0.37、0.38、0.45 (表 3)。冬小麦在 R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8 中的产量平均值分别为 3.49、3.55、3.57、3.38、3.53、3.50、4.03、4.09 t/hm²,茬口增产效果平均值分别为 0.01、0.15、0.18、0.20、0.17、0.23、0.11、0.43,变异系

表 1 EPIC 模型中冬小麦和春玉米部分重要生长参数
Table 1 Some important vegetal parameters of winter wheat and spring maize in EPIC model

参数名称 Parameter name	参数取值 Parameter		参数的意义 The meaning of parameter
CPNM	Winter wheat	Spring maize	
WA	31	42	潜在生物量-能量比率 Energy to biomass conversion factor(t/(hm ² ·MJ))
HI	0.4	0.5	收获指数(通常取值 0.01~0.95) Harvest index (generally in 0.01~0.95)
TB	15.0	25.0	作物生长最适温度 Optimal temperature for plant growth(℃)
TC	0.0	8.0	作物生长最低温度 Minimum temperature for plant growth(℃)
DMLA	6.0	6.0	最大潜在叶面积系数 Maximum potential leaf area index
DLAI	0.91	0.80	播种至作物叶面积系数达到最大时占整个生长期的比率(通常取值 0.4~0.99) Fraction of growing season when leaf area index starts declining(general value of it is 0.4~0.99)
RLAD	1.0	1.0	叶面积下降参数,1.00 代表线性(通常取值 0~10) Leaf-area-index decline rate parameter, 1.00 is representation of lineal decline(general value of it is 0~10)
RBMD	1.0	1.0	生物量-能量转换比率下降参数,1.00 代表线性(通常取值 0~10) Biomass-energy ratio decline rate parameter, 1.00 is representation of lineal decline(general value of it is 0~10)
GSI	0.007	0.007	最大气孔导度 Maximum stomatal conductance(m/s)
HMX	1.2	2.0	最大株高 Maximum crop height(m)
RDMX	4.0	4.0	根系对土壤水分的最大利用深度 Maximum depth in which soil water can be used by the root of crop(m)
FRST1	15.20	5.01	生物量遭受霜冻曲线参数,当温度达到零下(小数点左面数值)℃时,作物生物量损失(小数点右面数值) Frost damage parms. Numbers before the decimal = minimum temperature. Numbers after decimal = fraction lost when given minimum temperature is experienced(%)
FRST2	25.50	15.95	生物量遭受霜冻曲线参数,当温度达到零下(小数点左面数值)(℃)时,作物生物量损失(小数点右面数值) Frost damage parms. Numbers before the decimal = minimum temperature. Numbers after decimal = fraction lost when given minimum temperature is experienced(%)
RWPC1	0.40	0.40	出苗时根重系数 Root weight/biomass partitioning coefficient when seed emerge from soil
RWPC2	0.20	0.20	成熟时根重系数 Root weight/biomass partitioning coefficient when crop is mature

表 2 长武不同麦玉轮作系统中冬小麦和春玉米产量统计值
Table 2 Statistic value for spring maize and winter wheat yield of different rotation sequences at Changwu

项目 Item	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	CWW	CSC
平均 Average	4.61	4.40	4.16	4.48	4.28	4.29	4.71	4.55	3.38	5.22
最高值 Max	7.95	8.38	8.23	8.31	7.83	7.84	8.72	8.72	7.46	10.06
最低值 Min	0.27	0.24	0.24	0.29	0.23	0.70	0.29	0.74	0.84	1.41
标准差 Std	2.27	2.38	2.29	2.17	2.00	2.26	2.01	2.15	2.16	2.32
变异系数 CV(%)	49	54	55	48	47	53	43	47	64	44

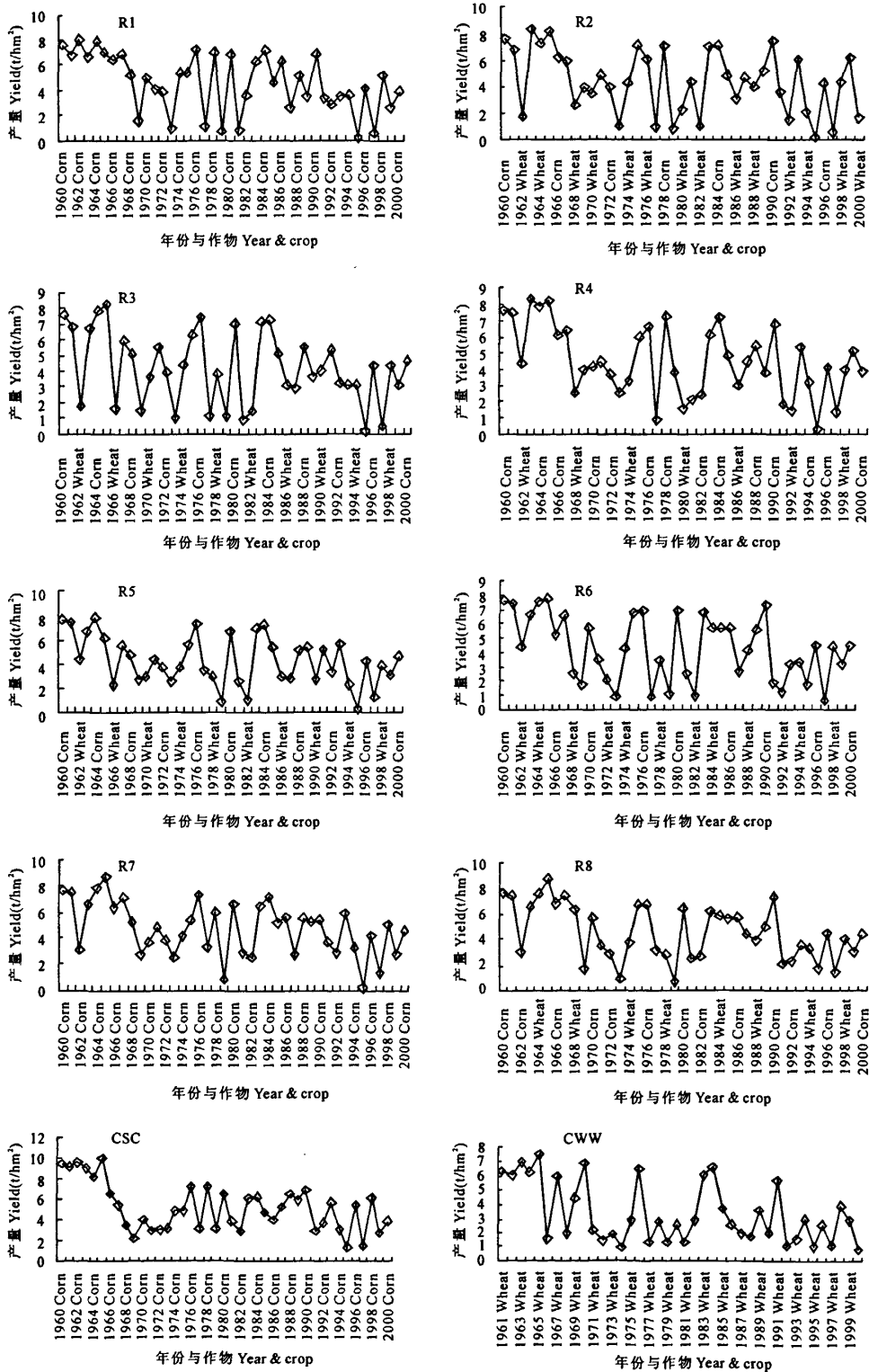


图 1 长武不同麦玉轮作系统中冬小麦和春玉米的产量变化

Fig.1 The change of winter wheat and spring maize yield under different rotation sequences at Changwu

数分别为 0.68、0.65、0.62、0.65、0.52、0.61、0.59、0.50(表 4)。两种作物相比,玉米产量平均值明显高于小麦。同连作相比,只有 R1、R2、R3、R6 中的春玉米产量得到了提高,所有麦玉轮作系统中的冬小麦

产量均得到了提高。不同麦玉轮作系统相比,茬口对春玉米的增产效果 R7、R5、R8、R4、R6、R3、R1、R2 依次增大,对冬小麦的增产效果 R1、R7、R2、R5、R3、R4、R6、R8 依次增大。

表 3 长武地区不同麦玉轮作系统中春玉米产量统计值

Table 3 Statistic value for spring maize yield of different rotation sequences at Changwu

项目 Item	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
平均 Average(t/hm^2)	5.68	6.03	5.79	4.99	5.01	5.42	4.93	4.85
最高值 Max(t/hm^2)	7.95	8.38	7.83	8.31	7.83	7.84	8.72	8.72
最低值 Min(t/hm^2)	2.94	3.91	3.21	1.31	1.32	1.71	1.32	1.44
标准差 Std(t/hm^2)	1.58	1.52	1.67	2.00	1.93	2.01	1.87	2.20
变异系数 CV	0.28	0.25	0.29	0.40	0.39	0.37	0.38	0.45
茬口增产效果 E	0.04	0.17	0.03	-0.01	-0.04	0.02	-0.06	-0.02

表 4 长武不同麦玉轮作系统中的冬小麦产量统计值

Table 4 Statistic value for winter wheat yield of different rotation sequences at Changwu

项目 Item	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
平均 Average(t/hm^2)	3.49	3.55	3.57	3.38	3.53	3.50	4.03	4.09
最高值 Max(t/hm^2)	6.96	8.23	8.23	8.23	6.93	7.59	7.01	7.59
最低值 Min(t/hm^2)	0.27	0.24	0.24	0.29	0.23	0.70	0.29	0.74
标准差 Std(t/hm^2)	2.37	2.32	2.21	2.19	1.83	2.12	2.38	2.05
变异系数 CV	0.68	0.65	0.62	0.65	0.52	0.61	0.59	0.50
茬口增产效果 E	0.01	0.15	0.18	0.20	0.17	0.23	0.11	0.43

2.2 不同麦玉轮作系统的经济效益

依据长武 2000~2007 年化肥的有效成分和平均价格(通过对长武十里铺村全体农户和该地区主要化肥销售商的实地调查得到),计算得到长武 2000~2007 年纯氮和纯磷的价格分别为 3.5 元/kg 和 4.5 元/kg,冬小麦的平均价格为 1.6 元/kg,春玉米的平均价格为 1.4 元/kg。在陕西省的调查结果表明,667 m^2 的玉米耕地,播种(包括种子),收割,脱粒所需费用分别为 25、35、20、10 元,合计为 90 元/667 m^2 即 1 350 元/ hm^2 ;同样面积的小麦耕地,播种,收割并脱粒所需费用分别为 30、70、40 元,合计为 140 元/667 m^2 即 2 100 元/ hm^2 ,则冬小麦的经济效益 $Y_{冬小麦}$ 的计算方法为:

$$Y_{冬小麦} = 1.6Y_{冬小麦} - 3.5X_{N冬小麦} - 4.5X_{P冬小麦} - 2100 \quad (1)$$

春玉米的经济效益 $Y_{春玉米}$ 的计算方法为:

$$Y_{春玉米} = 1.4Y_{春玉米} - 3.5X_{N春玉米} - 4.5X_{P春玉米} - 1350 \quad (2)$$

轮作系统的年平均经济效益 $Y_{平均}$ 的计算方法为:

$$Y_{平均} = (\sum Y_{冬小麦} + \sum Y_{春玉米})/N \quad (3)$$

公式(1)中 $Y_{冬小麦}$ 为冬小麦经济效益, $Y_{春玉米}$ 为春玉米经济效益, $X_{N冬小麦}$ 为冬小麦施氮水平, $X_{P冬小麦}$ 为冬小麦施磷水平;公式(2)中 $Y_{春玉米}$ 为春玉米经济效益, $Y_{春玉米}$ 为春玉米产量, $X_{N春玉米}$ 为春玉米施氮水平, $X_{P春玉米}$ 为春玉米施磷水平;公式(3)中 $Y_{平均}$ 为轮作系统在模拟研究期间的年平均经济效益, $\sum Y_{冬小麦}$ 为模拟研究期间轮作系统中冬小麦的总经济效益, $\sum Y_{春玉米}$ 为模拟研究期间轮作系统中春玉米的总经济效益, N 为模拟年限。根据公式(1)、(2)和(3)计算得到 R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8、CWW、CSC 平均每年每公顷的经济效益分别为 5 085、4 138、3 768、3 471、3 357、3 450、3 765、3 694、2 513、3 836 元,经济效益 $R1 > R2 > CSC > R3 > R7 > R5 > R8 > R4 > R6 > CWW$,麦玉轮作系统“春玉米→冬小麦”的经济效益最好。

2.3 冬小麦和春玉米所遭受的干旱胁迫天数

在 1960~2000 年模拟研究期间,8 种麦玉轮作系统中,R2 的冬小麦和春玉米所遭受的干旱胁迫日数最少,平均每年为 29.51 d。在春玉米中,R3 的春玉米所遭受的干旱胁迫天数最少,平均每年为 18.03 d;在冬小麦中,R2 的冬小麦所遭受的干旱胁迫天数最少,平均每年为 34.75 d(表 5)。同时表 5 也表明小麦受到的干旱胁迫程度较玉米严重。

不同麦玉轮作系统中作物所遭受的干旱胁迫天数变化趋势类似,均随着年降水量的减少和土壤水分的降低而呈波动性增加趋势。在模拟研究的 41 年中,1960、1962、1966、1969、1972、1977、1980、1983、1986、1991、1995 和 1997 等 12 年均均为严重干旱年型,干旱胁迫天数超过 40 d,其中 1995 为特旱年份,

R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8 在该年所种植的作物及其所遭受到的干旱胁迫天数分别为冬小麦 85.92 d、冬小麦 88.75 d、冬小麦 85.17 d、冬小麦 89.72 d、冬小麦 94.03 d、春玉米 31.46 d、冬小麦 90.43 d、春玉米 31.89 d,在长武旱塬区的干旱年份冬小麦比春玉米更容易遭受干旱威胁。

表 5 长武不同麦玉轮作系统中冬小麦和春玉米所遭受的干旱胁迫天数比较(d)

Table 5 Comparison for water stress days suffered by winter wheat and spring maize under different rotation sequences at Changwu

项目 Item	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	CSC	CWW
春玉米 Spring maize	21.50	19.41	18.03	28.55	26.65	22.47	27.88	27.68	36.93	—
冬小麦 Winter wheat	43.06	34.75	37.22	49.04	42.81	38.29	43.03	35.58	—	42.57
平均 Average	32.02	29.51	32.07	35.05	34.54	32.33	31.57	31.69	36.93	42.57

2.4 不同麦玉轮作系统的氮肥生产率

轮作系统的氮肥生产率,即每公顷粮田上的粮食产量/每公顷土地上所施用的纯氮肥量(kg /kg),这个值越大说明该轮作系统的氮肥生产率越高。表 6 是不同麦玉轮作系统的氮肥生产率的统计值,从表 6 可以看出 R1 和 R2 的氮肥生产率最高,均为 21.6 kg/kg;R4 的氮肥生产率最低。从表 6 也可以

看出,不同轮作系统的氮肥生产率不同,在 R1、R2、R3、R4、R5 和 R6 中春玉米的氮肥生产率比冬小麦的高,在 R7 和 R8 中春玉米的氮肥生产率反而比冬小麦的低。在统计的过程中发现,氮肥生产率较低的年份往往出现在干旱和种植小麦的年份里,而氮肥生产率较高的年份往往出现在湿润和种植玉米的年份里。

表 6 长武不同麦玉轮作系统的氮肥生产率(kg/kg)

Table 6 Production rate of N fertilizer under different rotation sequences at Changwu

项目 Item	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	CSC	CWW
平均值 Average	21.6	21.6	21.0	20.1	20.2	20.7	21.0	21.2	21.7	18.6
最高值 Max	38.7	45.7	45.7	45.7	38.5	42.2	38.9	42.2	41.9	41.4
最低值 Min	1.5	1.3	1.3	1.6	1.3	3.9	1.6	4.1	5.9	4.7
标准差 Std	10.4	11.3	11.2	9.6	9.0	10.5	9.2	10.0	9.6	11.6
变异系数 CV(%)	48	52	53	48	45	51	44	47	44	62
春玉米 Spring maize	23.6	25.1	24.1	20.8	20.9	22.6	20.5	20.2	21.7	—
冬小麦 Winter wheat	19.4	19.7	19.8	18.8	19.6	19.4	22.4	22.7	—	18.6

2.5 不同麦玉轮作系统的综合评价

为进一步评价不同的麦玉轮作系统,本文采用公式(4)对不同麦玉轮作系统的综合效果进行计算:

$$T = W + E + Y + N \tag{4}$$

式中,T表示麦玉轮作系统的综合效果;W表示由作物所遭受的干旱胁迫天数决定的干旱胁迫分量;E表示由轮作系统经济效益决定的经济效益分量;Y表示由产量决定的产量分量;N表示由作物所遭受的氮肥生产率决定的氮肥生产率分量。其中:

$$W = (1/W_s) \times 100 \times 0.15 \tag{5}$$

$$E = (EB/1000) \times 0.35 \tag{6}$$

$$Y = YD \times 0.35 \tag{7}$$

$$N = (NE/10) \times 0.15 \tag{8}$$

Ws表示作物所遭受的干旱胁迫天数,EB表示轮作系统的经济效益,YD表示轮作系统的作物产量,NE表示轮作系统的氮肥生产率;0.15和0.35为相应分量的权重;100,1000和10是为了使各个分量在加权之前处于同一个数量级(即都界于1~10之间)。虽然R1的平均产量低于R7,但R1经济效益最好,氮肥生产率最高。综合产量、经济效益、干旱胁迫天数和氮素胁迫天数,在长武旱塬区R1(春玉米→冬小麦)的综合效果(T值)最高为4.19(表7),显著高于其它麦玉轮作系统(α=0.05)。因此在长武旱塬区最适宜的麦玉轮作系统为春玉米→冬小麦。

表7 长武不同麦玉轮作系统的综合效果

Table 7 General impacts of different rotation sequences at Changwu

项目 Item	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	CSC	CWW
N	0.32	0.32	0.32	0.30	0.30	0.31	0.32	0.32	0.33	0.28
Y	1.61	1.54	1.46	1.57	1.50	1.50	1.65	1.59	1.83	1.18
E	1.78	1.45	1.32	1.21	1.17	1.21	1.32	1.29	1.34	0.88
W	0.47	0.51	0.47	0.43	0.43	0.46	0.48	0.47	0.41	0.35
T	4.19	3.82	3.56	3.51	3.41	3.48	3.76	3.68	3.91	2.69

3 讨论与结论

由于试验条件的限制,在评价轮作系统的增产效果时通常采用的方法为 $E = (Y_r - Y_c) / Y_c^{[41]}$,其中 E 为轮作的增产效果, Y_r 为一个轮作周期中所有作物的产量总和, Y_c 为该轮作周期中的某一作物在连作条件下,在相同的年份内(与轮作周期年数相同)该作物产量的总和。这种方法在难以获得大量长期连续数据的情况下,是比较合理的,但是受作物自身生产能力的限制,不同作物的 Y_c 值差异很大,因此采用这种方法对轮作系统的产量进行评价时,轮作系统的增产效果会被夸大(Y_c 值较小)或者缩小(Y_c 值较大)。本研究采用计算机模拟的方法克服了难以获得长期连续数据的缺点,在评价轮作系统的增产效果时所采用的参照作物(Y_0) 在轮作和连作条件下为同一作物,避免了这种误差的存在。

自从 EPIC 模型在美国德克萨斯州建立后,国际上许多学者对模型的作物生长子模块进行了模拟验证。大部分学者认为 EPIC 模型是一个能够评价农作管理措施(包括轮作措施)对作物产量影响的有效工具^[32-34,42,43]。在进行此次模拟研究之前对 EPIC 模型所进行的模拟验证工作^[8,26,27],表明 EPIC 模型和已经建立的数据库能够满足在黄土高原进行模拟研究的需要。由于模型没有考虑作物遗传因素对作物产量的影响,所以模拟结果没能考虑遗传育种工作对作物产量的影响;但采用计算机模拟的方法能够使气象、作物和土壤等重要影响因子在不同轮作系统间保持严格一致,进而能够真实反映轮作茬口对轮作系统产量的影响,因此本文对不同轮作系统的评价也就具有一定的参考价值。今后如果能够在模型中添加基因控制模块或许会提高模型的模拟精度,从而提高模拟结果的可信度。

本研究用计算机模拟的方法,集中对不同麦玉轮作系统进行了比较研究。结果表明:(1)在模拟研究期间,所有麦玉轮作系统中,R7 产量平均值最大,其次为 R1,R3 最低。从茬口增产效果看,R2 增产

效果最好,其次为 R8,最差的为 R7。两种作物相比,玉米产量平均值明显高于小麦。不同麦玉轮作系统相比,茬口对春玉米的增产效果 R2 最优,对冬小麦的增产效果 R8 最优,从经济效益看 R1 最优。(2)在模拟研究期间,所有麦玉轮作系统中冬小麦和春玉米平均每年所遭受的干旱胁迫日数在 R2 轮作系统中最少。玉米平均每年所遭受的干旱胁迫天数在 R3 中最少,小麦的在 R2 中最少,小麦受到的干旱胁迫程度较玉米严重。(3)在所有麦玉轮作系统中,R1 的平均产量仅次于 R7,经济效益最好,氮肥生产率最高,茬口对小麦的增产效果最好,对玉米也有一定的增产效果,并且 R1 的综合效果最好为 4.19。因此,在长武旱塬区适宜采用的麦玉轮作系统为春玉米→冬小麦。

参考文献:

[1] 来 璐,郝明德,王永功.黄土高原旱地长期轮作与施肥土壤微生物量磷的变化[J].植物营养与肥料学报,2004,10(5):546—549.

[2] 刘晓宏,郝明德,樊 军.黄土高原旱区长期不同轮作施肥对土壤供氮能力的影响[J].干旱地区农业研究,2000,18(3):1—7.

[3] 刘晓宏,田梅霞,郝明德.黄土旱塬长期轮作施肥土壤剖面硝态氮的分布与积累[J].土壤肥料,2001,1:9—12.

[4] 郭胜利,吴金水,党廷辉.轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响[J].中国农业科学,2008,41(3):744—751.

[5] 李 军,邵明安,王立祥.作物轮作方式产量效应模拟与优化选择研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2002,30(4):37—41.

[6] 胡立峰,李 琳,陈 卓,等.麦/玉两熟区农作模式分析及轮耕模式探讨[J].土壤,2007,39(2):243—246.

[7] 周少平,谭广洋,沈西颖,等.保护性耕作下陇东春玉米—冬小麦—夏大豆轮作系统土壤水分动态及水分利用效率[J].草业科学,2008,25(7):69—76.

[8] 王学春,李 军,樊廷录.黄土旱塬不同施肥水平下小麦玉米轮作的产量与土壤水分效应模拟研究[J].植物营养与肥料学报,2008,14(2):242—25.

[9] 杨学云,张树兰,袁新民,等.长期施肥对壤土硝态氮分布、累积和移动的影响[J].植物营养与肥料学报,2001,7(2):134—138.

[10] 王春阳,周建斌,郑险峰,等.不同栽培模式对小麦—玉米轮作

- 体系土壤硝态氮残留的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 991—997.
- [11] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 黄土高原旱地冬小麦/夏玉米轮作体系土壤的氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 759—76.
- [12] 丁 洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 玉米-小麦轮作系统中氮肥反硝化损失与 N_2O 排放量[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 557—560.
- [13] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 应用 DNDC 模型分析施肥和翻耕方式变化对旱田土壤 N_2O 释放的潜在影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 917—922.
- [14] 杨素芬, 苏 菊, 王宜伦, 等. 砂薄地冬小麦-夏玉米轮作施钾效应[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 243—245.
- [15] 邢素丽, 刘孟朝, 韩保文. 12 年连续施用秸秆和钾肥对土壤钾含量和分布的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 487—490.
- [16] 邱建军, 王立刚, 李 虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154—161.
- [17] 孟 磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687—692.
- [18] 宋志伟, 寇长林, 王秋杰. 豫东沙区冬小麦套作花生轮作制度中磷肥分配施用效果的研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 728—731.
- [19] 白灯莎·买买提艾力, 徐 舫, 黎芳芝, 等. 不同硫肥对小麦-油菜轮作体系作物产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2007, 44(3): 284—287.
- [20] 马春梅, 刘 侃, 唐远征, 等. 作物定位轮作体系长期试验研究—轮作与连作对土壤微生物的影响[J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(2): 147—152.
- [21] 靳学慧, 辛惠普, 郑 雯, 等. 长期轮作和连作对土壤中大豆胞囊线虫数量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(2): 189—193.
- [22] 樊廷录, 周广业, 王 勇, 等. 甘肃省黄土高原旱地冬小麦-玉米轮作制长期定位施肥的增产效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 127—131.
- [23] Chung P S, Cassman D, Huggins, et al. Evaluation of EPIC for tile flow and tile nitrate losses from three minnesota cropping systems[J]. Environ Qual, 2001, 30(3): 822—830.
- [24] Roloff R G, De Jong R, Zentner, et al. Estimating spring wheat yield variability with EPIC[J]. Plant Sci, 1998, 78(3): 541—549.
- [25] Geleta G S, Sabbagh J, Stone, et al. Importance of soil and cropping systems in the development of regional water quality policies[J]. Environ Qual, 1994, 23: 36—42.
- [26] 李 军, 邵明安, 张兴昌, 等. 黄土高原旱塬区高产玉米田土壤干燥化与产量波动趋势模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 54—58.
- [27] 王宗明, 梁银丽. 应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试[J]. 自然资源学报, 2002, 17(4): 481—487.
- [28] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. Trans ASAE, 1989, 32(2): 475—511.
- [29] 王尔大, Wyatt Harman, 郑大玮, 等. 旱作农区轮作和留茬处理方式对风蚀的影响——应用 EPIC 模型进行模拟和分析的武川案例[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1330—1336.
- [30] Williams J R, Dyke P T, Fuchs W W, et al. EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator: 2. User Manual. USDA Agriculture Technical Bulletin No, 1768, 1990, 20—40.
- [31] Texas A&M Blackland Research Center. Researcher's Guide to WinEPIC, Version 1.0. BRC report No. 0406, 2004. 31—45.
- [32] Bryant K J, Benson V W, Kiniry J R, et al. Simulating corn yield response to irrigation timings: validation of the EPIC model[J]. Prod Agric, 1992, 5: 237—242.
- [33] Geleta S, Sabbagh G J, Stone J F, et al. Importance of soil and cropping systems in the development of regional water quality policies[J]. Environ Qual, 1994, 23: 36—42.
- [34] Steiner J L, Williams J R, Jones O R. Evaluation of the EPIC simulation model using a dry-land wheat-sorghum-fallow crop rotation[J]. Agron J, 1987, 79(4): 732—738.
- [35] 康绍忠, 邵明安. 作物蒸发蒸腾量的计算方法研究[C]//刘志高. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊. 杨凌: 中国科学院水利部西北水土保持研究所, 1991: 15—20.
- [36] Williams J R. The EPIC model. Temple: USDA - ARS, grassland, soil and water research laboratory, 1997: 10—15.
- [37] 中国科学院黄土高原综合考察队. 黄土高原地区农业气象资源图集[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 15—40.
- [38] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第五卷)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 244—254.
- [39] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 20—50.
- [40] 李 军, 邵明安, 张兴昌. EPIC 模型中土壤氮磷运转和作物营养的数学模拟[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 166—173.
- [41] 曹广才, 韩靖国, 刘学文, 等. 北方旱区高效种植[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 100—103.
- [42] Moulin A P, Beckie H J. Evaluation of the CERES and EPIC models for predicting spring wheat grain yield over time[J]. Can J Plant Sci, 1993, 73(3): 713—719.
- [43] Kiniry J R, Major D J, Izaurralde R C, et al. EPIC model parameters for cereal, oilseed, and forage crops in the Northern Great Plains Region[J]. Can J Plant Sci, 1995, 75(3): 679—688.

(英文摘要下转第 95 页)

科学出版社,2006.

[18] 梁芳,杨光,李青,等. Visual Basic 程序设计案例教程

[17] 彭波. Visual Basic 编程技术全接触[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

A visual decision support system for optimizing planting structure of dryland crops

LI Yong-tao¹, GONG Dao-zhi^{2*}, MEI Xu-rong², ZHANG Fu-cang¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Key Laboratory of Dryland Agriculture, MOA, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on Jensen model of water production function, using the multi-objective program methods and Visual Basic 6.0, a visual decision support system was developed to optimize planting structure of dryland crops, such as wheat, corn, soybean, potato, sorghum and other crops. The users can input related data (multi-year rainfall, sunshine hours, daily maximum and minimum temperature, daily wind speed, etc.) and other basic parameters (soil, crops), and can optimize the structure of the main crops. Its operation is simple and practical. Its application was conducted in Jinzhong area in Shanxi, each crop's yield was predicted based on multi-year rainfall data under different types of year. Compared with the actual results, it proved to be reliable, so it can optimize and guide the crop planting structure and area, while uniting food production, economic benefits and water use.

Keywords: dryland agriculture; water production function; visual basic; optimizing planting structure

(上接第78页)

Simulation research on the effects of different rotation sequences on crop yield at Changwu arid-plateau

WANG Xue-chun¹, LI Jun^{1,2}, REN Jing-jing¹

(1. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Simulation results of EPIC model were analysed after the simulation of different rotation sequences. Considering grain yield, economic benefit, water stress days and productivity rate of N fertilizer generally, different rotation sequences were assessed, then the advantage and disadvantage were compared. The results showed that: (1) The average grain yield of 8 rotation sequences was 4.61, 4.40, 4.16, 4.48, 4.28, 4.29, 4.71 and 4.55 t/hm² respectively and a downward trend appeared during the simulation period. Considering economic benefit, spring maize-winter wheat was the best rotation sequence. (2) Water stress days, suffered by spring maize and winter wheat, of R2 (spring maize-winter wheat-winter wheat) was the least (29.51 days average) among 8 rotation sequences. Winter wheat was more susceptible to water stress than spring maize in the rotation system. The value of productivity efficiency of N fertilizer in R1 (spring maize-winter wheat) was the greatest among all rotation sequences. Taking grain yield, economic benefit, water stress days and productivity rate of N fertilizer into account, the appropriate rotation sequence was R1 (spring maize-winter wheat) on Changwu arid-plateau.

Keywords: rotation system; EPIC model; crop yield; Changwu arid-plateau