

作物轮作方式产量效应模拟与优化选择研究^{*}

李 军^{1,2}, 邵明安¹, 王立祥²

(1 中国科学院水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;
西北农林科技大学 2 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 针对田间轮作试验周期长、工作量大的实际问题, 采用作物生长模型DSSAT3和ALMANAC模拟研究了黄土高原典型地区作物轮作方式的产量效益, 提出了轮作耗水系数、轮作耗氮系数和轮作经济收益值的概念与计算公式, 并应用于作物轮作方式资源利用效率和经济效益评价, 得出了关中平原区、渭北高原区和银川平原区的最优轮作方式分别为“小麦—玉米→小麦—玉米”一年二熟制、“小麦→小麦—谷子→玉米”三年四熟制和“小麦/玉米→小麦/玉米”套作一年二熟制。

[关键词] 黄土高原地区; 作物轮作方式; 产量模拟; 优化选择

[中图分类号] S126.1; S344

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-2782(2002)04-0037-05

作物轮作是指在同一田地上将不同种类的作物按照一定顺序在一定年限内循环种植的农作方式, 一个地区的作物轮作方式是对当地农业资源利用程度与利用方式的具体反映。通过对一个地区各种轮作方式的产量效益、经济效益的评价, 可以筛选出资源利用率高、经济效益好的轮作方式。但由于田间轮作试验周期长、测定工作量大, 实际轮作试验研究受人力、资金和时间限制, 常常难以持续进行。本研究采用作物生长模型DSSAT3和ALMANAC模拟和评价黄土高原典型地区的主体轮作方式, 旨在探讨作物生长模拟在作物轮作效益评价中的应用方法, 同时也为该地区轮作方式优化提供决策依据。实际生产中, 一个地区的作物种类相当繁多, 轮作方式类型也丰富多样, 但由于2种模型中所包含的作物种类有限, 本研究仅以黄土高原典型地区最主要的轮作方式为例进行模拟研究。

1 DSSAT3和ALMANAC简介

作物生长模型是指能定量和动态地描述作物生长、发育和产量形成的过程及其对环境反应的计算机模拟程序, 有助于人们理解、预测和调控作物的生长发育和产量形成, 评价和选择最优作物栽培方案、种植模式与轮作方式。

DSSAT3是美国研制的包含多作物模型的特

大型作物模型软件包, 由数据模块、模型模块、分析模块、工具模块和安装关闭模块组成, 可对小麦、大麦、玉米、谷子、水稻、大豆、马铃薯等10种作物进行单季节和多季节的生长与产量模拟。在模型验证的基础上, 建立了黄土高原地区模型运行所需气象资料、土壤资料、作物品种遗传特性资料数据库, 覆盖了黄土高原各生态类型区^[1~6]。

ALMANAC模型是美国研制的一种多作物通用模型, 主要结构包含作物生长参数文件、土壤耕作措施文件、用户输入数据文件和模拟结果输出文件, 除了能模拟单作物生长与产量外, 还可模拟2种以上作物混作和套作对水、肥、光的竞争关系, 适合于多作物、长时段的产量模拟研究^[7,8]。

2 关中平原区多熟轮作方式模拟与评价

选择西安为试点, 对关中平原区一年二熟轮作方式进行模拟研究。限于DSSAT3模型所含的作物类型, 本研究选择“小麦—玉米→小麦—大豆”和“小麦—玉米→小麦—玉米”两种轮作方式进行研究。小麦品种为小偃22号, 玉米品种为陕单931, 大豆品种为秦豆5号, 栽培管理除灌水与施肥采用自动方式外, 其他措施同大田。模拟研究年限为1980~1992年, 模拟结果整理归纳于表1, 表中作物是按轮作方式中所处茬口位置顺序排列的, 所对应的数据

^{*} [收稿日期] 2002-02-25

[基金项目] 973计划资助项目(G2000018605); 陕西省自然科学基金计划资助项目(2001SM13)和西北农林科技大学科研重点专项资助项目

[作者简介] 李 军(1964-), 男, 甘肃涇川人, 副教授, 博士, 主要从事旱区农业资源开发与区域发展、高效耕作制度、作物生产模拟与决策等方面的研究。

是 12 年不同气候年型的平均值与标准差。

表 1 关中平原区多熟轮作方式模拟结果

Table 1 Simulated results of multiple crop rotation sequences on Guanzhong plain ($\bar{X} \pm X \sigma_{n-1}$)

轮作方式 Crop rotation sequences	作物 Crops	作物产量/ (kg · hm ⁻²) Grain yield	降水量/ mm Precipitation	灌水量/ mm Irrigation amount	蒸散量/ mm ETa	耗氮量/ (kg · hm ⁻²) N consumption amount	年有机质 变化率/% AOMCR	年有机氮 变化率/% AONCR	固氮量/ (kg · hm ⁻²) N fixed amount
小麦- 玉米 → 小麦- 大豆 Wheat- maize → wheat- soybean	小麦 Wheat	6 757 ± 657	230 ± 58	186 ± 30	444 ± 17	144 ± 28	- 0.72	- 0.76	-
	玉米 Maize	9 265 ± 2 250	326 ± 74	94 ± 12	355 ± 16	148 ± 39			-
	小麦 Wheat	6 844 ± 590	210 ± 56	169 ± 24	435 ± 28	150 ± 62			-
	大豆 Soybean	3 022 ± 59	307 ± 96	137 ± 61	336 ± 13	60 ± 10			227 ± 15
小麦- 玉米 → 小麦- 玉米 Wheat- maize → wheat- maize	小麦 Wheat	6 971 ± 525	210 ± 63	193 ± 29	432 ± 36	164 ± 33	- 0.67	- 0.65	-
	玉米 Maize	8 635 ± 2 251	326 ± 106	94 ± 43	256 ± 19	130 ± 36			-

注: 年有机质变化率和年有机氮变化率分别是指模拟期间土壤有机质和土壤有机氮的平均变化速率。

Notes: AOMCR and AONCR means annual organic matter change ratio and annual organic nitrogen change ratio of soil during simulation period

表 1 表明, 在“小麦—玉米→小麦—大豆”轮作方式中, 大豆虽然产量较低, 但每季可固氮 227 kg/hm², 实际耗用的土壤氮素仅 60 kg/hm², 减少了氮素的人工投入, 低产并不低效。由于模拟中没有进行秸秆还田, 土壤有机质从模拟初期的 128 t/hm², 经 12 年作物生长耗用后降低到 117 t/hm², 平均每年减少 0.72%, 占土壤全氮量 90% 以上的土壤有机氮也呈下降趋势, 平均每年减少 0.76%。所以, 实行秸秆还田是保证土壤有机质平衡的基本措施, 应引起足够的重视。“小麦—玉米→小麦—玉米”复种连作方式下, 土壤有机质与土壤有机氮也有类似的变化趋势。

为了便于不同轮作方式轮作效益的比较, 以 2 年轮作周期为时段, 统计计算了 2 种轮作方式的作物产量、耗水量、耗氮量, 并构造了轮作耗水系数、轮作耗氮系数与轮作经济收益值, 其公式如下:

轮作耗水系数 (m³/kg) = 轮作周期内各作物耗

水量之和 (mm) / 轮作周期内各作物产量之和 (kg/hm²)

轮作耗氮系数 (kg/kg) = 轮作周期内各作物耗氮量之和 (kg/hm²) / 轮作周期内各作物产量之和 (kg/hm²)

轮作经济收益值 (元/(hm² · 年)) = 轮作周期内各作物经济收益之和 (元/hm²) / 轮作年限 (年)

利用上述 3 个指标评价轮作方式的水、肥资源利用效率与经济效益, 计算结果列于表 2。根据轮作方式“小麦—玉米→小麦—大豆”与“小麦—玉米→小麦—玉米”的年平均经济产量、轮作耗水系数、轮作耗氮系数和轮作经济收益值的比较, 后者产出量高, 资源利用效率高, 经济收益好, 为最佳轮作方式, 评价结果与当前生产实际情况一致。但从蛋白质产出量和农田氮素平衡角度来考虑, 则以“小麦—玉米→小麦—大豆”轮作方式较好。

表 2 关中平原区 2 种多熟轮作方式效益比较

Table 2 Effects comparison of 2 multiple crop rotation sequences in rotation period on Guanzhong plain

轮作方式 Crop rotation sequences	轮作周期 作物总产量/ (kg · hm ⁻²) Total grain yield	轮作周期 总耗水量/mm Water consumption amount	轮作周期 总耗氮量/ (kg · hm ⁻²) N consumption amount	年平均作物 经济产量/ (kg · hm ⁻²) Average annual grain yield	轮作 耗水系数/ (m ³ · kg ⁻¹) Water consumption index	轮作 耗氮系数/ (kg · kg ⁻¹) N consumption index	轮作经济 收益值/ (元 · hm ⁻² · 年 ⁻¹) Economic return
小麦—玉米 → 小麦— 大豆 Wheat- maize → wheat- soybean	25 888	1 570	502	12 944	0.606	0.019 4	7 669
小麦—玉米 → 小麦— 玉米 Wheat- maize → wheat- maize	31 212	1 576	588	15 606	0.505	0.018 8	7 769

3 渭北高原区轮作方式的模拟与评价

选择渭北高原区的铜川为试点, 对不同复种程

度下轮作方式的产量潜力进行了模拟研究。

所选择的轮作方式有:

一年二熟制: 小麦—谷子→小麦—谷子 (I)

二年三熟制: 小麦—谷子→小麦	(II)	模拟中所采用的品种: 小麦为渭麦 6 号, 谷子为
小麦—谷子→玉米	(III)	74H 50-16-5-3, 玉米为农大 60。模拟试验为旱作农
三年四熟制: 小麦→小麦→小麦—谷子	(IV)	田无灌溉条件, 施肥采用自动施肥方式, 其他管理措
小麦→小麦—谷子→玉米	(V)	施同大田。通过对上述不同轮作方式在 1980~ 1992
四年五熟制: 小麦→小麦→小麦→小麦—谷子	(VI)	年 12 年间的模拟试验后, 将相同茬口作物在不同气
一年一熟制: 小麦→小麦→小麦	(VII)	候年型中的产量、耗水量及耗氮量统计整理列于表
小麦→小麦→玉米	(VIII)	3。表 3 中数据为 12 年的平均值和标准差。

表 3 渭北高原区不同轮作方式模拟结果

Table 3 Simulated results of different crop rotation sequences on Weibei highland ($\bar{X} \pm X \sigma_{n-1}$)

轮作方式编号 Number	轮作方式 Crop rotation sequences	作物 Crops	作物产量/ (kg · hm ⁻²) Grain yield	耗水量/mm Water consumption amount	耗氮量/ (kg · hm ⁻²) N consumption amount
I	小麦—谷子→小麦—谷子 W heat- m illet →w heat- m illet	小麦 W heat	2 474 ± 1 650	366 ± 79	100 ± 49
		谷子 M illet	1 425 ± 731	227 ± 56	82 ± 44
II	小麦—谷子→小麦 W heat- m illet →w heat	小麦 W heat	2 868 ± 1 340	515 ± 69	93 ± 41
		谷子 M illet	1 270 ± 394	221 ± 43	56 ± 21
		小麦 W heat	2 679 ± 1 504	383 ± 80	105 ± 57
III	小麦—谷子→玉米 W heat- m illet →m aize	小麦 W heat	2 437 ± 1 573	393 ± 73	103 ± 52
		谷子 M illet	1 615 ± 764	227 ± 48	83 ± 41
		玉米 M aize	9 502 ± 1 143	512 ± 35	184 ± 41
IV	小麦→小麦→小麦—谷子 W heat →w heat →w heat- m illet	小麦 W heat	2 467 ± 1 337	369 ± 87	93 ± 47
		小麦 W heat	2 970 ± 1 324	535 ± 53	120 ± 59
		小麦 W heat	2 828 ± 1 353	526 ± 61	109 ± 36
		谷子 M illet	1 301 ± 403	229 ± 43	66 ± 19
		小麦 W heat	2 285 ± 1 293	385 ± 64	105 ± 54
V	小麦→小麦—谷子→玉米 W heat →w heat- m illet →m aize	小麦 W heat	2 983 ± 1 402	529 ± 55	116 ± 53
		谷子 M illet	1 339 ± 472	224 ± 46	66 ± 19
		玉米 M aize	9 687 ± 884	524 ± 35	177 ± 39
VI	小麦→小麦→小麦→小麦—谷子 W heat →w heat →w heat →w heat- m illet	小麦 W heat	2 567 ± 1 353	389 ± 89	110 ± 49
		小麦 W heat	2 869 ± 1 313	522 ± 64	106 ± 41
		小麦 W heat	2 962 ± 1 266	532 ± 59	103 ± 35
		小麦 W heat	2 929 ± 1 335	526 ± 62	107 ± 35
		谷子 M illet	1 380 ± 484	228 ± 43	69 ± 22
VII	小麦→小麦→小麦 W heat →w heat →w heat	小麦 W heat	2 927 ± 1 357	524 ± 62	103 ± 33
		小麦 W heat	2 778 ± 1 446	426 ± 64	111 ± 59
VIII	小麦→小麦→玉米 W heat →w heat →m aize	小麦 W heat	2 987 ± 1 455	531 ± 56	111 ± 43
		玉米 M aize	9 820 ± 803	628 ± 36	175 ± 23

表 3 的模拟结果表明, 在有限降水条件下, 不同复种程度下的轮作方式作物产量的差异较大。轮作方式 III、V、VIII 轮作成分中有春玉米, 由于春玉米生长季节与降水分布吻合程度高, 产量潜力较大, 单产达 9 500 kg/hm² 以上, 同时耗水量也较大, 底墒差, 对后茬冬小麦的生长产生了不利影响, 玉米茬冬小麦一般减产 15%~ 20%。复种谷子在不同复种程度的轮作方式中产量有差异, 平均产量为 1 388 kg/hm², 耗水量 226 mm, 占同期降水量 (340 mm) 的 66%, 相当于同期农田蒸发量, 复种谷子虽对农田蓄水有一定影响, 但影响不大。谷子茬冬小麦一般减产 13% 左右, 减产量 380 kg/hm², 约为

谷子产量的 27%。从增加农田作物产出量角度考虑, 复种谷子是有利的。当复种程度从 125% 提高到 200%, 即从四年五熟提高到一年二熟, 轮作方式 I 和 III 的前茬小麦产量均较低, 复种谷子产量有所提高, 但产量变异幅度增大, 稳产性降低。因而, 在渭北高原旱作农田复种程度不宜过高, 一般不应超过 150%。

为了便于比较, 将不同轮作方式按轮作周期进行作物产量、耗水量与耗氮量的统计, 计算了轮作耗水系数、轮作耗氮系数和轮作经济收益值, 结果列于表 4。轮作方式 I~ VIII 的年平均作物产量依次为 3 899, 3 409, 6 777, 3 189, 5 431, 3 176, 2 927 和

5 159 kg/hm²。轮作方式Ⅲ、Ⅴ和Ⅷ的单产水平较高,轮作方式Ⅶ的单产水平最低。模拟结果表明,增加玉米种植有利于提高年平均作物产量,产量效益高。按轮作耗水系数由大到小排序:轮作方式Ⅶ>Ⅳ>Ⅵ>Ⅱ>Ⅰ>Ⅴ>Ⅷ>Ⅲ,说明轮作方式Ⅶ(小麦一年一熟制)水分利用效率低,轮作方式Ⅲ、Ⅴ和Ⅷ的水分利用效率较高。轮作耗氮系数也有类似的

变化趋势。轮作方式Ⅲ、Ⅴ和Ⅷ经济收益也较高,为较佳轮作方式。从产量稳定性考虑,“小麦→小麦→谷子→玉米”三年四熟制轮作方式与“小麦→小麦→玉米”一年一熟制轮作方式的产量变异幅度均小于“小麦—谷子→玉米”二年三熟制轮作方式,为最佳轮作方式。

表 4 渭北高原区旱作农田几种轮作方式效益比较

Table 4 Effects comparison of several crop rotation sequences in rotation period on dryland on Weibei highland

轮作 方式 编号 Number	轮作方式 Crop rotation sequences	轮作周期 作物总产量/ (kg·hm ⁻²) Total grain yield	轮作周期 总耗水量/mm Water consumption amount	轮作周期 总耗氮量/ (kg·hm ⁻²) N consumption amount	轮作 耗水系数/ (m ³ ·kg ⁻¹) Water consumption index	轮作 耗氮系数/ (kg·kg ⁻¹) N consumption index	轮作经济 收益值/ (元·hm ⁻² · 年 ⁻¹) Econom ic return
I	小麦—谷子→小麦—谷子 W heat- m illet→w heat- m illet	7 798	1 186	364	1 521	0 047	1 231
II	小麦—谷子→小麦 W heat - m illet→w heat	6 817	1 119	254	1 641	0 037	1 508
III	小麦—谷子→玉米 W heat - m illet→m aize	13 554	1 132	370	0 835	0 027	2 965
IV	小麦→小麦→小麦—谷子 W heat→w heat→w heat- m illet	9 566	1 659	388	1 734	0 041	1 326
V	小麦→小麦—谷子→玉米 W heat→w heat- m illet→m aize	16 294	1 862	464	1 020	0 028	3 195
VI	小麦→小麦→小麦→小麦—谷 子 W heat→w heat→w heat→ w heat- m illet	12 707	2 197	495	1 729	0 039	1 402
VII	小麦→小麦→小麦 W heat→ w heat→w heat	8 781	1 572	309	1 790	0 035	1 429
VIII	小麦→小麦→玉米 W heat→ w heat→m aize	15 585	1 585	397	1 017	0 025	2 940

4 银川平原区主要轮作方式模拟与优化选择

选择银川平原区的中宁为试点,代表黄土高原北部沿黄灌溉春麦区。由于DSSAT3模型不能模拟两种作物的间作套种,而ALMANAC模型不含有对水稻生长和产量的模拟成分,因而水稻与春小麦/玉米的轮作方式无法进行模拟研究。根据模型的可能

性,选择了“春小麦/玉米→春小麦/玉米”、“春小麦/大豆→春小麦/玉米”和“水稻→水稻”3种轮作方式进行模拟研究。前2种方式采用ALMANAC模型模拟,后1种采用CERES—水稻模型。按照模型要求生成输入文件后进行模拟,模拟结果整理归纳列于表5。其中,水稻的模拟结果为无水分和N素胁迫条件下的光温潜力。

表 5 银川平原区轮作方式模拟结果与效益比较

Table 5 Simulated results and effect comparison of crop rotation sequences on Yinchuan plain

轮作方式 Crop rotation sequences	轮作周期 作物总产量/ (kg·hm ⁻²) Total grain yield	轮作周期 总耗水量/mm Water consumption amount	轮作周期 总耗氮量/ (kg·hm ⁻²) N consumption amount	轮作 耗水系数/ (m ³ ·kg ⁻¹) Water consumption index	轮作 耗氮系数/ (kg·kg ⁻¹) N consumption index	轮作经济 收益值/ (元·hm ⁻² · 年 ⁻¹) Econom ic return
春小麦/玉米→春小麦/玉米 Spring wheat/m aize→spring wheat/m aize	32 180	2 946	780	0 915	0 024 2	10 113
春小麦/大豆→春小麦/玉米 Spring wheat/soybean→spring wheat/m aize	26 020	3 062	630	1 177	0 024 2	9 363
水稻→水稻 Rice→rice	28 846	6 000	720	2 080	0 025 0	9 452

由表5可见,依据轮作耗水系数、轮作耗氮系数和轮作经济收益值,“小麦/玉米→小麦/玉米”为最

佳轮作方式。水稻连作也是一种较好的种植方式,对光热资源利用率较高,但对水资源利用效率低。

[参考文献]

- [1] 中科院自然资源综合考察队. 中国农业气候资源图集(光能部分)[M]. 北京: 气象出版社, 1984
- [2] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第四卷, 第五卷)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995
- [3] Ritchie J T. Soil and weather inputs for the BSNA T crop models[Z]. East Lansing: Michigan State University, 1992
- [4] 陕西省种子管理站. 农作物优良新品种及栽培技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993
- [5] Tsuji G Y. DSSA T3 user's guide(Vol 1- 3)[M]. Honolulu: The university of Hawaii, 1994
- [6] 李 军, 邵明安, 樊廷录. 黄土高原作物生长模型DSSA T3 数据库组建[J]. 干旱地区农业研究, 2001, (1): 120- 126
- [7] Kiniry J R, Williams J R. A general, process-oriented model for two competing plant species[J]. Trans of ASA E, 1991, 35(3): 801- 810
- [8] 李 军. 作物生长模型ALMANAC 的验证与应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 1997, (4): 99- 104

Yield effects simulation and optimum choices of crop rotation sequences of typical areas on Loess Plateau of China

L I Jun^{1, 2}, SHAO M ing-an¹, WANG L i-xiang²

(1 State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation,
Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Shaanxi, Yangling 712100, China;

2 College of Agronomy, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The field crop rotation experiments usually need to conduct a long period and to do much work. In order to solve this problem, crop models DSSA T3 and ALMANAC were used to study output effect of main crop rotation sequences in typical areas on Loess Plateau. The concepts and calculation expressions of rotation-water-consumption-index, rotation-nitrogen-consumption-index and rotation-economic-return were advanced and used to evaluate crop rotation benefits on resources utilization efficiency and economic effects. The optimum crop rotation sequence on Guanzhong Plain, Weibei highland and Yinchuan plain is "wheat- maize → wheat- maize" four crops in two-year rotation, "wheat → wheat- millet → maize" four crops in three-year rotation and "wheat/maize → wheat/maize" four crops in two-year relay intercropping rotation respectively.

Key words: Loess Plateau; crop rotation sequence; yield simulation; optimum choice