

漳卫河平原农业水资源高效利用的模拟研究

II. 水分生产函数的建立及灌溉制度优化

潘登¹ 任理^{2*} 王英男³

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

3 国土资源部 土地整理中心, 北京 100035)

摘要 优化漳卫河平原冬小麦-夏玉米轮作体系的灌溉制度,对进一步深入研究水资源严重短缺的河南省可持续发展农业的发展具有一定的示范意义。本研究以经过参数率定与模拟验证的 SWAT 为工具,设置了 1 种充分灌溉和 9 种非充分灌溉情形,拟合得到冬小麦和夏玉米的 Jensen 模型水分生产函数,在此基础上,以不考虑氮磷胁迫的历史灌溉情景为基本情形,设置了 3 种优化灌溉方案。模拟结果表明:与基本情景相比,轮作体系粮食稳产,平均节约灌溉用水 16.13%,水分利用率平均提高 3.05%;与相应时段的年鉴统计值和模拟的历史情景下的产量相比,最优情景下全区轮作体系粮食平均增产 30.76%和 6.47%;与模拟的历史情景相比,优化情景下轮作体系的水分利用率平均提高 23.94%。

关键词 漳卫河平原; ET; 节水灌溉; 生产函数; 水分利用率

中图分类号 S 274.1

文章编号 1007-4333(2011)05-0020-06

文献标志码 A

Study on utilization of agricultural water resources with high efficiency in Zhangwei river plain

II. Crop water production function and optimal irrigation

PAN Deng¹, REN Li^{2*}, WANG Ying-nan³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. Centre of Land Consolidation, Ministry of Land and Resource, Beijing 100035, China)

Abstract Optimizing the irrigation schedule of winter wheat-summer maize rotation system in Zhangwei river plain has a great significant implication in studying agricultural sustainable development of Henan province which suffered serious shortage of water resources. Based on a calibrated model-SWAT, we set up one full irrigation and nine deficit irrigations to simulate sensitivity index of Jensen model of winter wheat and summer maize. We assumed the historical scenario which under non-stress of N and P as the basic scenario, then three irrigation scenarios were set to optimize it. The results showed in comparison with the base scenario, the yield of rotation system can keep stable, 16.13% of the mean irrigation water can be saved and the mean WUE increased by 3.05% under the optimum irrigation regime. Compared with yearbook and historical scenario, the mean yield of rotation system increased by 30.76% and 6.47%, and the mean WUE of rotation system increased by 23.94%.

Key words Zhangwei river plain; ET; water saving irrigation; production function; water use efficiency

收稿日期: 2011-03-14

基金项目: 国家“973”计划项目(2006CB403406, 2009CB118607)

第一作者: 潘登, 博士研究生, E-mail: ffdou@126.com

通讯作者: 任理, 教授, 主要从事土壤物理学和农业水文学研究, E-mail: renl@mx.cei.gov.cn

河南省是我国主要的粮食生产大省,冬小麦和夏玉米生产在全国占有重要的地位,小麦的播种面积占全国的 15%~16%,产量占全国的 16%~18%,玉米是河南省第二大种植作物,播种面积已达 250.83 万 hm^2 ,产量 131.63 亿 kg,占河南省粮食总产的 28.73%^[1-2]。河南省也是我国水资源严重缺乏的地区之一,目前水资源的消耗主要用于农田灌溉,在农业生产中如何科学合理用水,提高作物的水分利用率,是迫切需要解决的一个重大问题^[3]。国内在小麦和玉米等作物的优化灌溉方面进行了大量的研究,从水分生产函数^[4-6]到灌溉模型和灌溉决策专家系统^[7-9]都取得了众多的研究成果,应用作物生长模拟模型指导农田作物灌溉是其中一个重要方面。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是由美国农业部(USDA)的农业研究中心(ARS)研发的。SWAT 能够考虑各种管理措施及气候变化对水资源的影响,是一个比较成熟的流域分布式水文模型,模型主要应用于径流模拟研究、土地利用变化的水文效应研究、气候变化的水文效应研究、非点源污染研究等^[10-13]。SWAT 模型用简化的 EPIC(Erosion-Productivity Impact Calculator)模型的作物生长模块来模拟作物生长,但是将 SWAT 用于作物灌溉制度的优化,这样的报道尚不多见。本研究以漳卫河平原为研究区域,以经过参数率定和验证的 SWAT 模型为工具^[14],拟合冬小麦和夏玉米的水分生产函数模型,并在此基础上优化灌溉制度。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

漳卫河流经山西、河北、河南、山东 4 省以及天津市,干流总长 932 km。流域面积 3.77 万 km^2 ,其中山区面积约占 68.3%,平原约占 31.7%,本研究区域为漳卫河平原区。漳卫河流域属于暖温带大陆性季风气候,平原区多年平均降水量为 595 mm。冬季是全年降水最少的季节,降水量仅占全年的 2%左右。

1.2 Jensen 模型

常用的作物分生育阶段耗水量-产量关系模型可分为加法模型和乘法模型,这 2 类模型在我国都有一定程度的应用^[15]。本研究选择了较为广泛使用的乘法模型 Jensen 模型,计算公式如下:

Jensen 模型(1968):

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_i^{\lambda_i} \quad (1)$$

式中, i 为生育阶段; λ_i 为作物对水分亏缺的敏感系数(指数); n 为生育阶段总数; ET_a 为全生育期实际作物腾发量; ET_m 为全生育期最大作物腾发量; Y 为作物实际产量; Y_m 为作物最大产量。

1.3 模型构造

为了构造相对处理 Y/Y_m 以及对应的相对腾发量 ET_{ai}/ET_{mi} ,本研究设计了充分灌溉处理(冬小麦和夏玉米的模拟产量不受到水分胁迫)以及 9 个非充分灌溉处理(表 1)。

表 1 冬小麦-夏玉米轮作体系非充分灌溉处理

Table 1 Deficit irrigation schedules for winter wheat-summer maize rotation system

灌水 处理	冬小麦阶段灌水量/mm						夏玉米阶段灌水量/mm			
	播种-越冬	越冬-返青	返青-拔节	拔节-抽穗	抽穗-灌浆	灌浆-收获	播种-拔节	拔节-抽穗	抽穗-灌浆	灌浆-收获
1	60	0	0	0	60	60	40	0	0	0
2	0	60	0	60	60	0	0	40	0	0
3	0	0	60	0	60	60	0	0	40	0
4	0	60	0	60	0	60	0	0	0	40
5	60	0	0	60	0	0	0	0	0	0
6	0	60	0	0	60	0	40	0	0	0
7	0	0	0	60	60	0	0	40	0	0
8	0	0	60	0	0	60	0	0	40	0
9	0	0	0	60	0	60	0	0	0	40

本课题组曾得到了经过率定的 SWAT 模型的参数校正值^[14],既有以区间形式表示的参数,也有“最优”模拟结果对应的一套“最优”参数,由于区间形式的参数不便于进行水分生产函数的计算,本研究使用“最优”参数进行水分生产函数的计算和灌溉制度优化,将十套灌溉处理分别输入到 SWAT 模型中,其余输入项与前述研究一致。将模型输出各灌溉处理下冬小麦和夏玉米产量以及各生育阶段的 ET_a。通过最小二乘法拟合得到 Jensen 模型的水分敏感指数,运行时段为 1957—2005 年(1957—1960 年为预热时段)。

1.4 冬小麦和夏玉米水分生产函数

表 2 列出了漳卫河平原流域尺度上多年平均冬小麦和夏玉米不同生育阶段的水分敏感指数,从水分敏感指数的全区平均值(面积加权平均)来看,对于冬小麦,水分最敏感的生育期是拔节-抽穗期和

灌浆-收获期,其次是越冬-返青期和抽穗-灌浆期,最不敏感的是播种-越冬期和返青-拔节期。从整个生育期看,越冬期和返青期由于植株较小,温度不太高,茎叶还未迅速生长,此时对水分的要求并不严格,而从拔节-抽穗期开始,冬小麦进入营养生长与生殖生长并进阶段,而且此时温度较高,叶面积迅速增大,蒸发蒸腾强度大,水分亏缺对籽粒产量形成有很大影响^[16]。本研究结果与申孝军^[17]以及肖俊夫^[16]在中国农业科学院农田灌溉研究所通过田间试验数据得到的水分敏感指数排序较为一致。

对于夏玉米,对水分最敏感的生育阶段是抽穗-灌浆期,其次是拔节-抽穗期和灌浆-收获期,最不敏感的是播种-拔节期。各生育期的水分敏感程度与夏玉米的生长规律是一致的。肖俊夫等^[15]用 Jensen 模型计算得到的华北地区夏玉米分生育期水分敏感指数敏感程度排序与本文的结果基本一致。

表 2 多年平均冬小麦和夏玉米不同生育阶段水分敏感指数

Table 2 Average annual water sensitivity index of winter wheat and summer maize

子流域 编号	冬小麦						夏玉米			
	播种-越冬	越冬-返青	返青-拔节	拔节-抽穗	抽穗-灌浆	灌浆-收获	播种-拔节	拔节-抽穗	抽穗-灌浆	灌浆-收获
1	-0.11	0.00	0.03	0.28	0.07	0.09	0.00	0.03	0.03	0.02
2	-0.34	0.10	-0.02	0.21	0.09	0.23	0.01	0.00	0.05	0.03
3	-0.06	0.00	0.08	0.28	0.06	0.06	0.00	0.01	0.04	0.01
4	-0.06	0.00	0.08	0.27	0.05	0.04	0.00	0.01	0.02	0.01
5	-0.11	0.00	0.04	0.28	0.07	0.10	0.00	0.01	0.01	0.01
6	-0.21	0.10	-0.02	0.24	0.06	0.17	0.00	0.02	0.04	0.01
7	-0.19	0.12	-0.02	0.25	0.05	0.15	0.00	0.02	0.04	0.01
8	-0.25	0.07	-0.03	0.16	0.15	0.18	0.01	0.00	0.03	0.01
9	-0.19	0.06	-0.09	0.09	0.16	0.35	0.01	0.02	0.04	0.01
平均值	-0.19	0.06	-0.01	0.21	0.09	0.18	0.03	0.12	0.31	0.11

1.5 优化灌溉情景设置

本研究基于拟合的冬小麦和夏玉米水分敏感指数,对冬小麦设定越冬-返青期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期以及灌浆-收获期 4 个生育阶段为关键生育期,对夏玉米设定拔节-抽穗期和抽穗-灌浆期为关键生育期。在不考虑氮磷胁迫的情况下,以建立 SWAT 模型的灌溉制度为基本灌溉情景(表 3),设置如下 3 个优化灌溉情景:

情景一:保留基本灌溉情景在关键生育期内的

灌溉。

情景二:灌溉时间和灌溉次数与情景一相同,每次灌溉量设为情景一的 2/3。

情景三:在冬小麦关键生育期灌溉,每次灌溉量为丰水年和平水年灌 40 mm、枯水年 50 mm、特枯水年 60 mm;对于夏玉米,平水年在抽穗-灌浆期灌溉 30 mm,枯水年在关键生育期各灌溉 30 mm,特枯水年在关键生育期各灌溉 40 mm,灌溉时间为每个关键生育期的第一天。

表3 基本情景下灌溉制度
Table 3 Irrigation schedule of basic scenario

作物	灌溉分区	水文年型	灌水时间	灌水定额/mm
冬小麦	黑龙港南区	平水	越冬期、拔节期、抽穗期、灌浆期	77
		枯水	越冬期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期	69
		特枯水	越冬期、返青期、拔节期、孕穗抽穗期、灌浆期	62
	豫北区	平水	越冬期、拔节期、孕穗期、灌浆期	61
		枯水	越冬期、拔节期、孕穗期、灌浆期	71
		特枯水	越冬期、拔节期、孕穗期、灌浆期	71
夏玉米	黑龙港南区	平水	播前	19
		枯水	播前	72
		特枯水	播前、抽穗期、灌浆期	71
	豫北区	平水	苗期、灌浆期	61
		枯水	苗期、灌浆期	96
		特枯水	苗期、拔节期、灌浆期	96

注：灌溉制度数据依据《中国主要作物需水量等值线图研究》制定。

由表3可知，豫北区的冬小麦灌溉时间都是在关键生育期，比较合理，而黑龙港南区的冬小麦、夏玉米的灌溉时间以及豫北区的夏玉米灌溉时间都需要调整。为了比较3个优化灌溉方案的优化效果，本研究选取土壤吸收的灌溉量、产量和水分利用率(WUE)3个指标作为评价指标。

2 结果与分析

2.1 冬小麦灌溉制度优化结果

漳卫河平原子流域尺度上4种灌溉情景下多年平均冬小麦全生育期土壤吸收的灌溉量、产量以及WUE见表4。土壤吸收的灌溉量是指SWAT模型

表4 1961—2005年多年平均冬小麦生育期土壤吸收的灌溉量、产量以及WUE

Table 4 Average(1961—2005) annual irrigation amount which absorbed by soil, yield and WUE of winter wheat

子流域 编号	土壤吸收灌溉量/mm				产量/(kg/hm ²)				WUE/(kg/m ³)			
	基本 情景	情景 1	情景 2	情景 3	基本 情景	情景 1	情景 2	情景 3	基本 情景	情景 1	情景 2	情景 3
1	186	181	157	160	5 479	5 482	5 435	5 214	1.88	1.88	1.88	1.84
2	177	173	153	156	5 397	5 397	5 366	5 154	1.82	1.82	1.83	1.80
3	232	196	157	164	5 214	4 969	4 845	4 912	1.56	1.60	1.60	1.56
4	225	191	156	164	5 250	5 036	4 908	4 986	1.61	1.67	1.67	1.62
5	183	178	154	162	5 466	5 466	5 432	5 241	1.87	1.87	1.87	1.84
6	184	179	155	163	5 401	5 401	5 351	5 145	1.81	1.81	1.81	1.78
7	186	182	155	162	5 502	5 503	5 435	5 229	1.82	1.82	1.82	1.79
8	180	177	156	159	5 261	5 262	5 219	5 002	1.71	1.71	1.72	1.69
9	175	173	151	152	5 217	5 217	5 180	4 946	1.64	1.64	1.65	1.62
平均值	188	180	154	159	5 345	5 308	5 253	5 081	1.74	1.75	1.76	1.72

模拟灌溉过程时,实际被土壤吸收的水量,它小于或等于模型输入的灌溉量。与基本情景相比,情景一下土壤吸收的灌溉量的全区平均值(面积加权平均)减少 4.43%,产量的全区平均值降低 0.68%,WUE 的全区平均值提高 0.46%;情景二下土壤吸收的灌溉量的全区平均值减少 17.84%,产量的全区平均值降低 1.72%,WUE 的全区平均值提高 0.74%;情景三下土壤吸收的灌溉量的全区平均值减少 15.51%,产量的全区平均值降低 4.93%,WUE 的全区平均值降低 1.19%。

综合以上分析,从节水效果以及作物水分利用率来看,情景二表现最优,说明情景二的灌溉制度设置更加符合作物对水分的需求规律。但是由于基本

情景下的河南区灌溉制度比较合理,而研究区域中河南区占的面积比重达到 74%,所以冬小麦最优灌溉方案的优化效果并不显著。

2.2 夏玉米灌溉制度优化结果

4种灌溉情景下多年平均夏玉米的3项指标见表5。与基本情景相比,情景一下土壤吸收的灌溉量的全区平均值减少3.10%,产量的全区平均值提高3.25%,WUE的全区平均值提高4.84%;情景二下土壤吸收的灌溉量的全区平均值减少16.13%,产量的全区平均值提高2.80%,WUE的全区平均值提高4.77%;情景三下土壤吸收的灌溉量的全区平均值减少59.30%,产量的全区平均值降低0.48%,WUE的全区平均值升高4.31%。

表5 1961—2005年多年平均夏玉米生育期土壤吸收的灌溉量、产量以及WUE

Table 5 Average(1961—2005) annual irrigation amount which absorbed by soil,yield and WUE of summer maize

子流域 编号	土壤吸收灌溉量/mm			产量/(kg/hm ²)				WUE/(kg/m ³)				
	基本 情景	情景 1	情景 2	情景 3	基本 情景	情景 1	情景 2	情景 3	基本 情景	情景 1	情景 2	情景 3
1	88	88	77	33	7 463	7 758	7 702	7 342	2.20	2.31	2.31	2.29
2	85	86	75	31	7 526	7 806	7 781	7 460	2.19	2.29	2.29	2.28
3	28	28	21	32	6 268	6 474	6 435	6 481	2.20	2.32	2.32	2.31
4	30	29	22	32	6 462	6 697	6 644	6 698	2.23	2.36	2.35	2.34
5	85	82	74	31	7 640	7 844	7 785	7 509	2.22	2.32	2.31	2.31
6	87	82	74	31	7 485	7 702	7 659	7 320	2.18	2.29	2.29	2.27
7	84	79	72	31	7 638	7 850	7 812	7 509	2.18	2.28	2.28	2.27
8	85	85	75	31	7 301	7 615	7 588	7 325	2.11	2.22	2.22	2.22
9	75	69	63	27	7 658	7 845	7 838	7 609	2.11	2.21	2.21	2.20
平均值	75	72	64	30	7 347	7 586	7 553	7 312	1.96	2.02	2.02	2.00

综合上述分析,情景二的各项指标表现较好,而情景三则在节水效果上优势明显。由于夏玉米的基本灌溉制度在平水年和枯水年多在播前和苗期灌溉(表3),而依据夏玉米水分敏感指数,播期前后夏玉米对水分不敏感,因此经过优化的灌溉制度更加符合夏玉米对水分的需求。

2.3 优化灌溉情景与历史情景、统计年鉴值的对比

为了进一步检验优化灌溉情景的效果,本文收集了漳卫河平原 1985—2005 年部分县的冬小麦和夏玉米统计年鉴产量,并用面积加权法聚合到子流域上,便于和子流域上的模型模拟产量对比,另外,

本研究也将优化灌溉的产量和 WUE 与 1985—2005 年历史情景(建立 SWAT 模型时的情景)的模拟结果进行对比,结果如下:1985—2005 年模拟的优化情景下的冬小麦、夏玉米和轮作体系的全区平均产量分别为 5 231、7 372 和 12 603 kg/hm²。与相应时段的模拟的历史情景下的产量和统计年鉴产量相比,最优情景下全区冬小麦平均减产 2.60% 和增产 13.31%,夏玉米平均增产 14.0% 和 46.81%,轮作体系平均增产 6.47% 和 30.76%。

1985—2005 年模拟的优化情景下的冬小麦、夏玉米和轮作体系的全区平均 WUE 分别为 1.76、

2.24 和 2.02 kg/m³,与历史情景相比,优化情景下全区冬小麦 WUE 平均提高 14.57%、夏玉米 WUE 平均提高 29.67%、轮作体系 WUE 平均提高 23.94%。由以上可知,历史情景下的夏玉米产量、冬小麦和夏玉米的 WUE 还有较大的增长空间。

3 讨论

水资源匮乏是漳卫河平原农业生产的最大障碍之一,研究冬小麦和夏玉米的耗水规律,并用来指导灌溉制度优化有着重要的意义。本研究以经过率定验证的 SWAT 模型为工具,拟合得到冬小麦和夏玉米 Jensen 模型的水分敏感指数,确定出冬小麦和夏玉米的关键生育期:冬小麦关键生育期为越冬-返青期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期以及灌浆-收获期,夏玉米关键生育期为拔节-抽穗期和抽穗-灌浆期。

以基本灌溉情景为目标设置 3 套优化灌溉方案,综合考虑灌溉量、产量以及 WUE 3 项指标,优选出冬小麦-夏玉米轮作体系最优灌溉方案。在冬小麦生育期,与基本情景相比,最优灌溉情景节省灌溉量 17.84%,产量降低 1.72%,WUE 提高 0.74%;在夏玉米生育期,与基本情景相比,最优灌溉情景节省灌溉量 14.41%,产量提高 2.80%,WUE 提高 4.77%。与基本情景相比,在保证冬小麦-夏玉米轮作体系稳产的条件下,最优灌溉情景可节约灌溉用水 16.13%、提高 WUE 3.05%。通过优化灌溉情景的产量、WUE 与历史情景的产量、WUE 以及统计年鉴值的产量对比可知,历史情景下的夏玉米产量、冬小麦和夏玉米的 WUE 还有较大的增长空间。

总体来看,基本情景下冬小麦的灌溉方案已经较为优化,而夏玉米的基本灌溉制度通过最优灌溉方案的调整后,能够有效地节约灌溉用水,提高水分利用率。当然,本文基于分布式水文模型 SWAT 而优化的灌溉制度尚需在实践中进一步验证和完善。

致谢 本课题组硕士研究生唐胜蓉在资料的收集及数据的处理上给予了帮助,谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] 殷长锁. 河南省冬小麦优化灌溉决策及应用[J]. 农业技术经济, 1995(4): 42-45
- [2] 刘经纬, 关仙平, 周联东, 等. 河南省玉米生产现状及发展对策[J]. 2009(S1): 41-42
- [3] 邓天宏, 方文松, 付祥军, 等. 冬小麦夏玉米土壤水分预报及优化灌溉模型[J]. 2005, 33(1): 68-72
- [4] 杜尧东, 邵洋. 春小麦水分敏感指数与有限水量生育期的最优分配[J]. 运筹与管理, 2002, 11(5): 77-82
- [5] 周智伟, 尚松浩, 雷志栋. 冬小麦水肥生产函数的 Jensen 模型和人工神经网络模型及其应用[J]. 水科学进展, 2004, 14(3): 281-284
- [6] 孙书洪, 王学安, 王仰仁. 基于作物水分生产函数下的限额灌溉制度优化研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(10): 105-108
- [7] 茆智, 李远华, 李会昌. 实时灌溉预报[J]. 中国工程科学, 2002, 4(5): 24-33
- [8] 毛振强, 张银锁, 宇振荣. 基于作物生长模型的夏玉米灌溉需求分析[J]. 作物学报, 2003, 29(3): 419-426
- [9] 张兵, 黄文生, 周瑛, 等. 基于 COM 组件的农业灌溉优化决策软件的开发[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 16159-16160
- [10] Arnold J G, Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds[J]. J Hydrol, 1996, 176: 57-77
- [11] Fohrer N, Haverkamp S, Frede H G. Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas[J]. Hydrol Process, 2005, 19: 659-672
- [12] 陈军峰, 李秀彬. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(7): 668-674
- [13] Chen E, Mackay D S. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model[J]. J Hydrol, 2004, 295: 211-224
- [14] 潘登, 任理, 王英男. 漳卫河平原农业水资源高效利用的模拟研究 I. 参数率定和模拟验证[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 13-19
- [15] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 中国主要作物分生育期 Jensen 模型研究[J]. 节水灌溉, 2008(7): 1-4
- [16] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 新乡地区冬小麦耗水量与产量关系研究[J]. 河南农业科学, 2009(1): 55-59
- [17] 申孝军, 孙景生, 张寄阳, 等. 非充分灌溉条件下冬小麦耗水规律研究[J]. 人民黄河, 2007(11): 68-70

(责任编辑: 袁文业)