

施肥水平对长武旱塬地冬小麦产量影响的模拟

王学春¹, 李 军^{1,2*}, 郝明德²

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

摘 要: 为了在实时气象条件下确定旱塬区适宜的肥力水平和产量水平, 在模拟精度验证基础上, 应用 WinEPIC 模型模拟研究了黄土高原长武旱塬地 1957~2001 年期间不同肥力水平下连作冬小麦田产量效应。模型验证结果表明 CK、N、NP 处理产量模拟值与观测值之间的相关系数分别为 0.740、0.764 和 0.740, 均达到显著水平, WinEPIC 模型对不同肥力处理下冬小麦籽粒产量模拟较为准确。模拟结果表明, 无肥、低肥、中肥和高肥处理下连作冬小麦的产量均呈现波动性降低趋势, 其平均值分别为 1.055、1.422、2.405 和 3.170 t/hm², 不同肥力处理间差异显著, 以中肥和高肥处理增产效果最好。为黄土高原南部沟壑区旱地小麦生产的可持续发展提供了科学依据。

关键词: 黄土高原; 施肥水平; 冬小麦产量; WinEPIC 模型

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0045-06

王学春, 李 军, 郝明德. 施肥水平对长武旱塬地冬小麦产量影响的模拟[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 45-50.

Wang Xuechun, Li Jun, Hao Mingde. Simulation of fertilization effect on winter wheat yield in Changwu dry highland[J].

Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 45-50.(in Chinese with English abstract)

0 引 言

冬小麦是黄土高原南部半湿润沟壑区旱塬地的主要粮食作物之一, 施肥是其增产的主要技术措施之一。目前的相关研究^[1-6], 对不同肥力水平下作物产量的比较较多, 但缺乏长期(大于 20 a)的连续监测。主要是因为大田试验条件下, 很难完成如此长周期、复杂的试验任务。在李军教授研究的基础上^[7-9], 本研究对 EPIC 模型进行了进一步的修订与验证, 使修订的模型更加适合在黄土高原地区应用, 为农业决策提供了一条可以依赖的途径。利用验证过的模型对不同肥力水平下连作冬小麦田产量波动性进行了长期定量模拟研究, 分析了不同肥力水平下连作冬小麦产量的变化趋势, 为黄土高原南部沟壑区旱地小麦生产的可持续发展提供了科学依据。

1 试验方法

1.1 WinEPIC 模型简介

环境政策综合气候模型 (Environmental Policy Integrated Climate, EPIC) 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、水文学、侵蚀泥沙、营养循环、农药残留、作物生长、土壤温度、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, 定量模拟农田水土资源和作物生产力长周期动态变化过程, 可用来评价农田作物生产管理策略和水土资源环境效应^[9-11]。本研究采用的 WinEPIC 3060 版, 是能够在 Windows 环境下运行的、

用户界面友好的新一代 EPIC 模型, 适用于作物生产系统综合性模拟分析和应用研究, 模型中土壤水分动力学过程描述比较细致, 可以输出逐日分层土壤水分模拟结果, 特别适合于旱地土壤水分生态环境效应的模拟和分析^[12]。

1.2 WinEPIC 模型数据库

WinEPIC 模型运行需要逐日气象要素、土壤剖面理化特性、作物生长参数和肥料管理等数据库的支持。逐日气象数据以陕西长武站为代表点, 将长武站 1957~2001 年实时观测的逐日太阳辐射、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速等气象要素数据序列, 根据模型的气象数据格式要求进行格式转换, 建成逐日实时气象数据库^[9]。土壤数据库以长武旱塬地农田典型土种——黑垆土为代表, 通过实地测定和收集整理相关数据, 生成黑垆土 0~7 m 土层土壤剖面理化性状参数^[13,14](表 1)。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^[15]。根据黄土高原旱塬地冬小麦栽培技术和生理生态试验研究成果, 对长武站冬小麦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 39 个生理生态参数进行了修订(表 2)。

1.3 模拟研究方法

为了比较不同肥力水平下冬小麦产量情况, 设定 4 种处理: 无肥 (N 0 kg/hm², P 0 kg/hm²)、低肥 (N 45 kg/hm², P 15 kg/hm²)、中肥 (N 90 kg/hm², P 30 kg/hm²) 和高肥 (N 150 kg/hm², P 75 kg/hm²), 肥料施用时间同于大田。在 1957~2001 年期间, 定量模拟和分析比较长武旱塬地冬小麦连作条件下产量变化和土壤干燥化效应。在统计冬小麦生产年度降水量时, 以冬小麦的一个生产年度(每年 7 月初冬小麦收获~次年 6 月底冬小麦成熟)为时段进行统计; 在分析麦田逐月土壤有效含水量变

收稿日期: 2007-04-14 修订日期: 2008-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30471024, 30771280, 40371077)

作者简介: 王学春 (1979—), 男, 博士生, 主要从事作物生产系统模拟与决策研究。杨凌 西北农林科技大学农学院, 712100。

Email: langzi0509@sina.com

*通讯作者: 李 军 (1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。杨凌 西北农林科技大学农学院, 712100。Email: junli@nwsuaf.edu.cn

化动态时，以每月 15 日土壤有效含水量模拟数据代表该月土壤有效含水量；在分析麦田土壤湿度剖面分布变化特征时，采用模型输出的每年 8 月 30 日土壤湿度剖面分布模拟数据代表该年麦田的土壤湿度剖面分布特征。

表 1 WinEPIC 模型中长武旱塬黑垆土部分重要理化参数
Table 1 Some important physical and chemical parameters for Heilu Soil in Changwu dry highland in WinEPIC model

土层/m	田间持水量 /m ³ ·m ⁻¹	萎蔫系数 /m ³ ·m ⁻¹	土壤容重 /g·cm ⁻³	pH	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	碳酸钙含量 /%	磷浓度 /ppm	速效氮浓度 /ppm	有机氮含量 /ppm	有机碳含量 /%
0~0.01	0.28	0.10	1.30	8.2	9.6	8	4	30	613	0.62
0.01~0.2	0.28	0.10	1.30	8.2	9.6	8	4	50	613	0.62
0.2~0.5	0.28	0.11	1.31	8.2	9.9	6.8	3.0	50	452	0.45
0.5~1	0.28	0.11	1.31	8.3	12.2	7.0	3.0	40	553	0.55
1~2	0.28	0.12	1.32	8.4	8.6	14.2	2	30	400	0.45
2~3	0.27	0.13	1.32	8.3	9.7	11.9	2	20	480	0.58
3~4	0.27	0.13	1.33	8.2	6.5	13.5	5	20	511	0.41
4~5	0.27	0.13	1.33	8.2	4.5	12.6	3	0	451	0.45
5~6	0.26	0.14	1.33	8.3	3.5	10.8	3	0	451	0.45
6~7	0.26	0.14	1.33	8.4	2.0	14.2	2	0	400	0.4

表 2 WinEPIC 模型中冬小麦部分重要生长参数修订值
Table 2 Some important revised vegetal parameters of winter wheat in WinEPIC model

参数名称	参数取值	参数的意义
CPNM	Winter wheat	作物名称
WA	30	潜在生物量-能量比率/t·hm ⁻² ·MJ ⁻¹
HI	0.4	收获指数（通常取值 0.01~0.95）
TB	15.0	作物生长最适温度/℃
TG	0.0	作物生长最低温度/℃
DMLA	6.0	最大潜在叶面积系数
DLAI	0.91	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）
RLAD	1.0	叶面积下降参数，1.00 代表线性（通常取值 0~10）
RBMD	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）
GSI	0.007	最大气孔导度/m ² ·s ⁻¹
HMX	1.2	最大株高/m
RDMX	4.0	最大根系分布深度/m
FRST1	15.20	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）（%）
FRST2	25.50	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）（%）
RWPC1	0.40	出苗时根重系数
RWPC2	0.20	成熟时根重系数

2 WinEPIC 模型模拟精度验证

李军等利用长武试区长期定位试验数据验证了冬小麦连作条件下的作物产量与土壤水分动态，其中冬小麦产量和麦田 3 m 土层土壤有效含水量模拟值和观测值的相对误差分别为 3.9%和 11.7%，相关系数分别为 0.878和 0.859，均达到显著水平^[7]；表明 EPIC 模型能够较为准确的模拟冬小麦连作条件下的产量变化和土壤水分动态。

本文利用长武站长期连续定位试验数据^[6]验证 WinEPIC 模型对不同肥力水平下连作冬小麦的产量模拟精度。长武旱塬地连作冬小麦在 3 个肥力处理水平下进行产量效应模拟精度验证，分别为：1）无肥处理，不施任何肥料（CK）；2）氮处理，施纯氮 90 kg/hm²（N）；3）氮磷处理，施纯氮 90 kg/hm²、纯磷 39.6 kg/hm²（NP），

肥料施用时间与当地大田管理相同。利用长武站 1957~2001 年实时气象数据、黑垆土土壤数据和已经验证过的冬小麦生长参数，对冬小麦的不同肥力处理进行模拟研究。

将 3 个处理的产量模拟值和观测值进行比较（如表 3 和图 1 所示）以评价模型的精确性，其中观测值为长武试验站 1985~2001 年长期定位试验中的冬小麦产量^[1]。由表 3 可知，在 1985~2001 年模拟试验研究期间，CK、N、NP 处理冬小麦模拟产量平均值分别为 1.413、2.528、2.891 t/hm²，相应的试验观测产量平均值分别为 1.400、2.280 和 2.980 t/hm²，模拟值和实测值的相关系数分别为 0.740、0.762 和 0.740，均达到显著水平，平均相对误差分别为 0.93%、10.88%、-2.99%，模拟均方根误差 RMSE 分别为 0.663、1.017、1.107 t/hm²。

表 3 长武旱塬不同施肥处理连作冬小麦产量模拟值与观测值的统计值比较

Table 3 Comparison of statistic values between simulated and observed yield of continuous winter wheat under different fertilization treatments

项 目	无肥处理 (CK)			N 处理			NP 处理		
	模拟值 /t • hm ⁻²	观测值 /t • hm ⁻²	相对误差 /%	模拟值 /t • hm ⁻²	观测值 /t • hm ⁻²	相对误差 /%	模拟值 /t • hm ⁻²	观测值 /t • hm ⁻²	相对误差 /%
平均值	1.413	1.400	0.93	2.528	2.280	10.88	2.891	2.980	-2.99
RMSE		0.663			1.017			1.107	
回归方程		y=196+0.852x			y=0.158+0.839x			y=0.909+0.718x	
相关系数		0.740*			0.762*			0.740*	

图 1 为 3 种施肥处理冬小麦产量模拟值与观测值逐年变化曲线的比较，二者均有较为近似的变化趋势，表明 EPIC 模型可以较为精确的模拟不同施肥处理下冬小麦轮作产量，可用于黄土高原连作冬小麦的产量效应模拟研究。

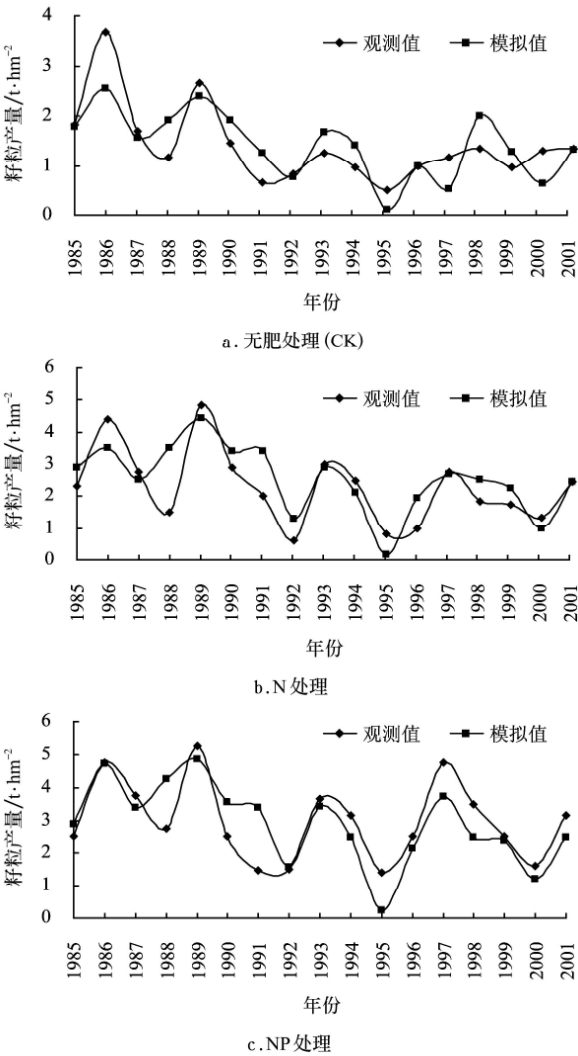


图 1 不同施肥处理下连作冬小麦产量模拟值与观测值的比较

Fig.1 Comparison between simulated and observed yield of continuous winter wheat under different fertilization treatments

3 连作冬小麦的产量与胁迫

3.1 不同肥力水平下连作冬小麦的产量变化

在 1957~2001 年模拟研究期间，无肥、低肥、中肥和高肥 4 种肥力处理下产量变化范围分别为 0.048~3.109、0.061~4.452、0.119~5.771 和 0.195~6.887 t/hm²，平均值分别为 1.055、1.422、2.405 和 3.170 t/hm²，标准差分别为 0.819、1.114、1.606 和 1.885 t/hm²，表现出随肥力水平提高，产量波动幅度增大的趋势。4 种肥力处理产量变异系数分别为 77.7%、78.3%、66.8% 和 59.5%，无肥和低肥处理的产量稳定性稍低于中肥和高肥处理，但无肥、低肥、中肥和高肥处理产量极差分别为 3.061、4.391、5.652 和 6.692 t/hm²，表现出随肥力增加产量年际变化振幅加大趋势。4 种肥力处理间产量差异显著，低肥、中肥和高肥处理分别较无肥处理增产 34.8%、128.0% 和 200.5%。在 1958~2001 年模拟研究期间，4 种肥力处理连作冬小麦产量模拟值均呈现剧烈波动性趋势（如图 2 所示），在模拟前 10 a（1958~1967 年），无肥、低肥、中肥、高肥 4 种肥力处理冬小麦产量平均值分别为 1.766、2.605、3.708 和 4.649 t/hm²，而模拟后 10 a（1992~2001 年）各处理冬小麦产量平均值分别为 0.447、0.724、1.205 和 1.631 t/hm²，产量降低幅度分别高达 1.319、1.881、2.503 和 3.018 t/hm²，分别减产 74.7%、72.2%、67.5% 和 64.9%。

由于无肥、低肥、中肥和高肥 4 种肥力处理产量模拟值变化趋势基本一致，若以高肥处理产量模拟值为判断依据，1958、1959、1963~1965、1967、1971、1975、1976、1983 和 1984 年 11 个年度冬小麦产量高于 4.5 t/hm²，为丰产年，占 44 个生产年度的 25%；1962、1966、1969、1973、1977、1979、1981、1982、1992、1995、1997、2000 和 2001 年 13 个年度冬小麦产量低于 2.0 t/hm²，为低产年，占 29.5%，其余 20 个年份冬小麦产量介于 2.0~4.5 t/hm²，为平产年，占 45.5%。高产年份多出现在模拟前期和降水较多的年份，低产年份则多出现在模拟后期和降水较少的年份。在丰产和平产年份，肥力处理间产量差异十分明显，施肥处理明显高于无肥处理，而在低产年份，肥力处理间产量差异较小。在 44 个生产年度内，4 种肥力处理产量最低值均出现在 1995 年，产量均低于 0.2 t/hm²，其余产量低谷期为 1973、1997、2000 和 2001 年，产量均低于 1 t/hm²；产量最高值则为模拟前期降雨较多的 1964~1965 年，其余产量高峰期为 1958~1959、1975~1976 和 1983~1984。

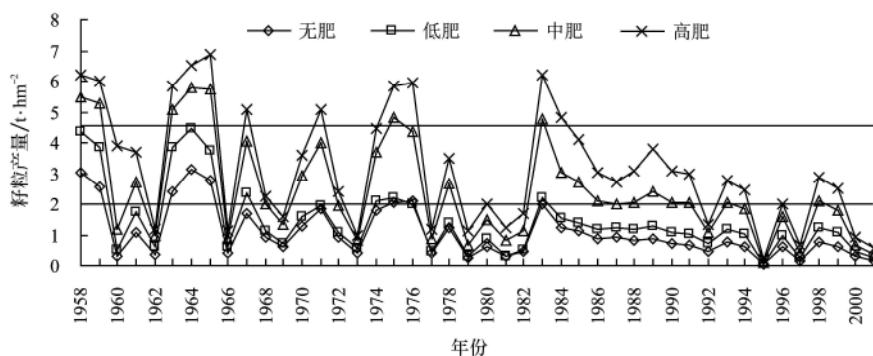


图 2 长武旱塬不同肥力处理下连作冬小麦产量模拟值变化比较

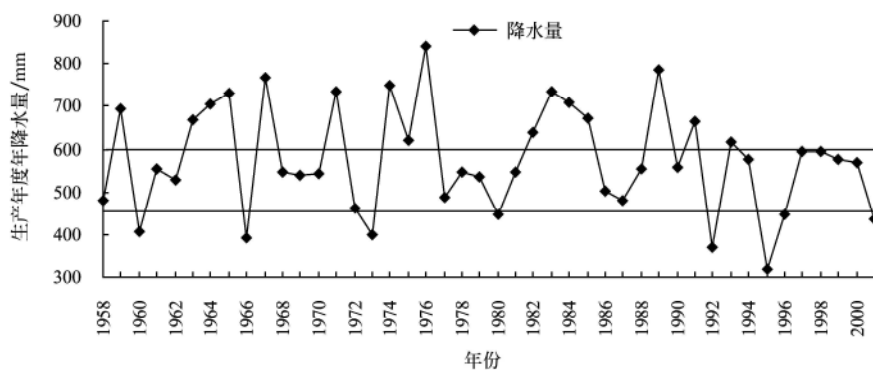
Fig.2 Comparison of simulated winter wheat yield of continuous cropping under different fertilization treatments in Changwu dry highland

3.2 不同处理下连作冬小麦的干旱胁迫与氮素胁迫

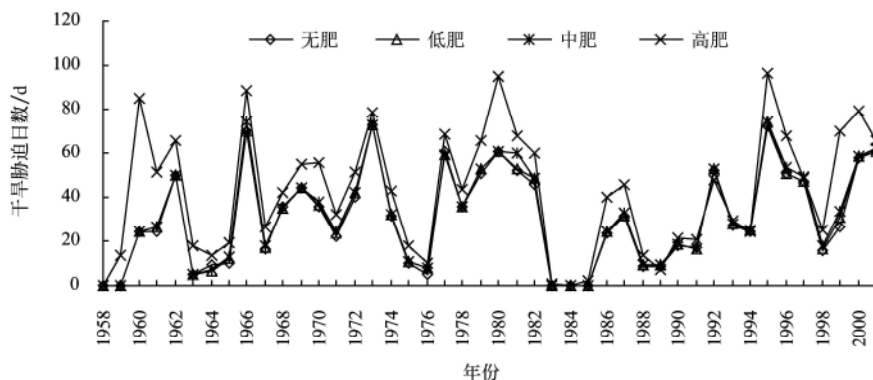
在 1958~2001 年模拟研究期间, 冬小麦生产年度降水量平均值为 576 mm, 其中前 10 a (1958~1967 年) 平均值为 592 mm, 后 10 年(1992~2001 年)平均值为 509 mm, 后期较前期年降水量减少 83 mm (如图 3 所示)。在 1958~2001 年 44 个冬小麦生产年度中, 1960、1966、1973、1980、1992、1995、1996 和 2001 年 8 个冬小麦生产年度降水量不足 450 mm, 为干旱年型, 而 1959、1963~1965、1967、1971、1974~1976、1982~1985、1989、1991 和 1993 年 16 个冬小麦生产年度降水量超过了 600 mm, 为丰水年型。

在 44 a 期间, 无肥、低肥、中肥和高肥处理冬小麦

生育期干旱胁迫日数分别介于 0~73、0~74、0~74 和 0~96 d, 年平均值分别为 30.8、31.4、32.0 和 42.6 d, 标准差为 22.0、22.1、22.5 和 27.7 d, 无肥、低肥和中肥处理间差异不大, 但与高肥处理差异明显。不同处理干旱胁迫日数变化趋势类似, 且与冬小麦生产年度降水量变化趋势相反 (如图 3), 4 种肥力处理干旱胁迫日数从前 10 a (1958~1967 年) 平均值 21.0、21.1、21.7 和 38.3 d 增加到后 10 a (1992~2001 年) 的 43.5、44.5、45.5 和 55.4 d。其中 1995 年干旱胁迫天数最高, 4 种肥力处理分别为 72、74、74 和 96 d, 表明高肥处理的冬小麦更容易遭受到干旱胁迫。



a. 生产年度年降水量



b. 不同肥力处理下连作冬小麦田干旱胁迫天数模拟值比较

图 3 长武旱塬冬小麦生产年度降水量、不同肥力处理下连作冬小麦田干旱胁迫天数模拟值比较

Fig.3 Comparison of annual precipitation and simulated soil water stress days of continuous winter wheat field under different fertilization treatments in Changwu dry highland

在 1958~2001 年的 44 年模拟研究期间, 无肥、低肥、中肥和高肥处理冬小麦生育期氮素胁迫日数分别介于 0~89、0~90、0~76 和 0~63 d, 年均氮素胁迫日数分别为 29.6、31.0、23.4 和 14.9 d, 表现为随施肥量增加, 氮素胁迫程度逐渐降低趋势, 无肥、低肥与中肥和高肥处理之间差异显著, 各施肥处理氮素胁迫天数总体呈现

波动性上升趋势(如图 4)。其中, 无肥和低肥的冬小麦生产从 1965 和 1967 年开始遭受氮素胁迫, 而中肥和高肥的则分别从 1971 和 1976 年开始。结果表明, 低肥和无肥处理的冬小麦比中肥和高肥处理的更容易遭受到氮素胁迫; 增加施氮量能明显延迟氮素胁迫出现的时间, 降低氮素胁迫的程度。

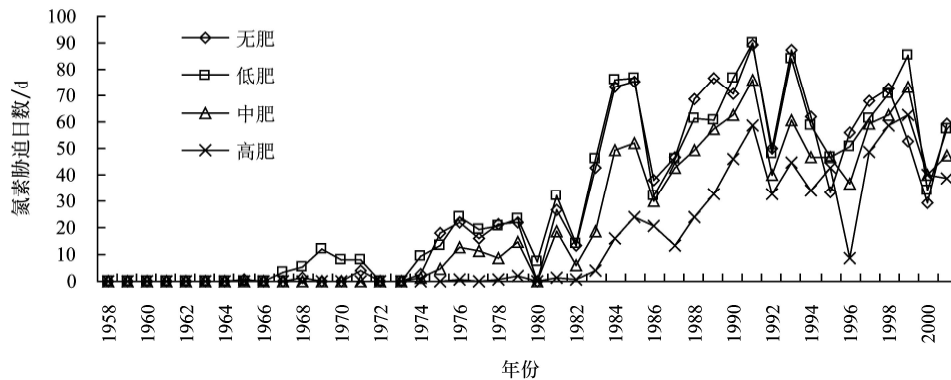


图 4 长武旱地不同肥力处理下连作冬小麦田氮素胁迫天数模拟值比较

Fig.4 Simulated nitrogen stress days of continuous winter wheat field under different fertilization treatments in Changwu dry highland

4 结论与讨论

1) 利用 WinEPIC 模型模拟研究了黄土高原长武旱地不同肥力处理下连作冬小麦的产量效应, CK、N、NP 处理产量模拟值与观测值之间的相关系数分别为 0.740、0.762 和 0.740, 均达到显著水平, 平均相对误差分别为 0.93%、10.88%、-2.99%, 表明 WinEPIC 模型对不同肥力处理下冬小麦籽粒产量模拟较为准确, 较为适用于黄土高原旱地冬小麦连作系统的模拟研究。

2) 在 1958~2001 模拟研究期间, 在无肥、低肥、中肥和高肥 4 种肥力水平下, 连作冬小麦的产量均呈现显著的波动性下降趋势, 其平均值分别为 1.055、1.422、2.405 和 3.170 t/hm², 中肥和高肥处理增产效果最好。高肥处理麦田干旱胁迫日数明显高于无肥、低肥和中肥处理, 而氮素胁迫日数明显低于无肥、低肥和中肥处理。

3) 模型对土壤剖面分层数目最大为 10 层, 对 0~7 m 的剖面深层土壤湿度状况描述还不够细致。对作物的描述没有考虑基因的对作物的影响, 虽然考虑了环境对作物整体的影响, 但没有考虑环境对基因表达方面的影响, 有待于今后进一步深入研究和改进。

【参 考 文 献】

[1] 张树兰, Lars Lovdahl, 同延安. 渭北旱地不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 20-24.

[2] 薛绪掌, 陈立平, 孙治贵, 等. 基于土壤肥力与目标产量的冬小麦变量施氮及其效果[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 59-62

[3] 黄明斌, 党廷辉, 李玉山. 黄土区旱地农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J]. 农业工程学报 2002, 18(6): 50-54.

[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] 胡亚妮, 刘文兆, 王 俊, 等. 黄土塬区氮磷配施对冬小麦光合作用、产量形成及水分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 159-161.

[6] 郝明德, 王旭刚, 党廷辉, 等. 黄土高原旱地小麦多年定位施用化肥的产量效应分析[J]. 作物学报, 2004, 22(3): 1108-1102.

[7] 李 军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原旱地冬小麦水分生产潜力与土壤水分动态的模拟研究[J]. 自然资源学报 2004, 19(16): 738-745.

[8] 李 军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原地区 EPIC 模型数据库构建[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 21-26.

[9] 李 军, 邵明安, 张兴昌, 等. 黄土高原旱地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

[10] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth model. Trans ASAE, 1989, 32(2): 475-511.

[11] Williams J R, Dyke P T, Fuchs W W, et al. EPIC—Erosion/Productivity Impact Calculator: 2. User Manual [M]. USDA: Agriculture Technical Bulletin, 1990.

[12] Texas A & M Blackland Research Center. Researcher's Guide to WinEPIC, Version 1.0[M]. BRC report No.0406, 2004.

[13] 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.

[14] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

[15] 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.

Simulation of fertilization effect on winter wheat yield in Changwu dry highland

Wang Xuechun¹, Li Jun^{1,2*}, Hao Mingde²

(1. College of Agronomy, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to determine the suitable level of fertilization and production in dry highland under real time meteorological condition, the WinEPIC model was used to simulate continuous winter wheat yield under different fertilization treatments in Changwu dry highland based on model validation. The validation result shows that correlation coefficients of winter wheat yield between observed and simulated are 0.740, 0.762 and 0.740 respectively for treatments of CK, N and NP, which all reach significant level. Win EPIC model can simulate winter wheat yield precisely under different fertilization treatments. The simulation results indicate that grain yields of the continuous winter wheat under no fertilization, low fertilization, medium fertilization and high fertilization treatments decrease significantly with fluctuation, average yields are 1.055, 1.422, 2.405 and 3.170 t/hm², respectively. The differences among treatments are significant. Medium and high fertilization treatments are better to increase winter wheat yield. The results can provide scientific basis for sustainable development of winter wheat in Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; fertilizer level; winter wheat yield; WinEPIC model