

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

王学春¹, 李军^{1,2*}, 樊廷录³

(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; 3 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃兰州 730070)

摘要:在模拟精度验证基础上,应用 WinEPIC 模型模拟研究了黄土高原旱塬地 1957~1998 年期间不同施肥水平下小麦玉米轮作方式“春玉米→春玉米→冬小麦→冬小麦→冬小麦→冬小麦”的产量变化和土壤水分效应。模拟结果表明:1)无肥、低肥、中肥和高肥处理下,小麦玉米轮作方式的模拟产量均呈现波动性降低趋势,其平均值分别为 1.573、3.272、3.877 和 4.318 t/hm²,其适宜的施肥量范围为 N 90~120 kg/hm²、P 30~60 kg/hm²;2)4 种施肥处理下,小麦玉米轮作田逐月土壤有效含水量均呈现波动性降低趋势,平均每年分别减少 8.5、10.3、12.3 和 12.0 mm,无肥、低肥和中肥处理间土壤有效含水量差异十分显著;3)在模拟初期(1957~1962)出现了土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的干燥化过程,在模拟中后期(1975~1980,1993~1998)均出现了稳定的土壤干层,无肥和低肥处理土壤干层分布于 2—3 m 和 2—4 m 土层,中肥和高肥处理均分布于 2—5 m 土层,表现出随肥力和作物产量水平的提高,土壤干层厚度逐渐加深。

关键词:黄土高原;作物轮作;WinEPIC 模型;产量;施肥;土壤水分

中图分类号:S147.22;S152.7

文献标识码:A

文章编号:1008-505X(2008)02-0242-10

Modeling the effects of winter wheat and spring maize rotation under different fertilization treatments on yield and soil water in rain-fed highland of Loess Plateau

WANG Xue-chun¹, LI Jun^{1,2*}, FAN Ting-lu³

(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;

3 Dryland Agriculture Institute, Agricultural Academy of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The WinEPIC model was used to simulate the effects of winter wheat and spring maize rotation “spring maize → spring maize → winter wheat → winter wheat → winter wheat → winter wheat” under different level fertilization treatments on yield and soil water at Changwu rainfed highland of the Loess Plateau. The results showed that the simulated crop yield of the wheat-maize rotation under no fertilization, low fertilization, medium fertilization and high fertilization treatment decreased significantly with fluctuation, and the average yield was 1.573, 3.272, 3.877 and 4.138 t/ha, respectively. The suitable fertilization rates were N at 90–120 kg/ha and P₂O₅ at 30–60 kg/ha. Simulated monthly available soil water amount of all 4 fertilization treatments declined with annual and seasonal fluctuations, and the average annual decreasing rate was 8.5, 10.3, 12.3 and 12.0 mm, respectively. Differences of soil water amount among no fertilization, low fertilization and medium fertilization treatments were very significant. Soil moisture decreased and desiccated soil layers thickened gradually at the beginning of simulation (1957–1962). Stable desiccated soil layers occurred during middle (1975–1980) and end (1993–1998) of simulation. Distribution depth of desiccated soil layers was 2–3 m

收稿日期:2007-03-15 接受日期:2007-07-26

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

作者简介:王学春(1979—)男,山东威海,硕士研究生,主要从事作物生产系统模拟与决策研究。

Tel: 029-87055888, E-mail: langzi050901@yahoo.com * 通讯作者 Tel: 029-87082963, E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

of no fertilization treatment, 2–4 m of low fertilization treatment and 2–5 m of both medium and high fertilization treatments, indicating that desiccated soil layers thickened with increasing fertilization and crop yield.

Key words: Loess Plateau; crop rotation; WinEPIC model; crop yield; fertilization treatment; soil water

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,以肥调水技术的推广和应用,使旱地小麦和玉米产量翻了一翻^[1]。但由于作物耗水量和耗水深度增加,降水入渗深度变浅,导致了旱作高产粮田深层土壤水分过耗和土壤干燥化现象发生;2 m 以下深层土壤水库贮水量亏缺,作物生产对当季降水供给依赖增大,作物产量年际波动性加剧^[2-3]。樊廷录等^[4]利用长期定位试验研究了不同肥力水平下的小麦和玉米轮作制的增产效果,但缺少对轮作期间的土壤水分利用和土壤干燥化进程的监测。目前的相关研究只是揭示了旱作高产粮田的干燥化现象,对不同肥力水平下高、中、低产粮田的产量和深层土壤水分变化动态缺乏细致的定量研究。在李军等^[5-6]初步模拟研究旱塬地冬小麦和春玉米连作条件下的水分生产潜力和根层土壤水分动态基础上,本研究着重于对不同肥力水平下小麦和玉米轮作制的产量波动性和土壤干燥化过程的定量研究,分析小麦—玉米轮作中不同肥力水平下作物产量的变化趋势和土壤干燥化规律,寻求与当地降水状况相适应的、有利于土壤水分可持续利用的合理施肥水平和土壤水分承载力,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 WinEPIC 模型简介

侵蚀和生产力影响计算模型 EPIC(Erosion – Productivity Impact Calculator),现在改称为环境政策综合气候模型(Environmental Policy Integrated Climate)是美国研制的定量评价“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。其作物模拟模块包含 70 余种作物类型,能以天为时间步长,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^[7-8]。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。模型对土壤水分

运转过程描述比较细致,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^[9]。

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。逐日气象数据以长武站为代表点,将收集到的长武 1957~2001 年实时数据(逐日太阳辐射、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速)根据模型的格式要求导入气象数据库中,建成逐日实时气象数据库。

通过实地观测和查阅相关资料^[10-11]确定 EPIC 模型需要的旱塬地典型土壤—黑垆土的土壤剖面理化性状参数(表 1)。本研究将南部旱塬地黑垆土分成了 10 个剖面层,土层总厚度为 7.0 m,依次输入逐层土壤理化性状参数。EPIC 模型作物参数数据库中的每种作物都有唯一的生理生态参数。通过设定作物参数控制作物的生长发育进程,描述阶段发育与形态发育状况,计算作物对土壤水分、养分的吸收数量,估算温度、水分、养分、土壤通气状况和 Al^{3+} 对生物量积累和经济产量形成的胁迫^[7]。通过查阅相关文章和实测数据,分别对试区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 39 个生理生态参数进行了修订(表 2)。

肥料数据库中的每种肥料都有自己相应的参数(包括速效磷含量、速效氮含量、速效钾含量、有机磷含量、有机氮含量、有机碳含量、盐分含量、氮含量)。本研究根据实际大田生产条件和我国肥料生产标准,在模型中添加了适合当地实际情况的碳酸氢铵、磷酸二铵和尿素三种肥料。

1.3 轮作模拟中施肥水平与轮作方式

在无肥(N 0 kg/hm², P 0 kg/hm²)、低肥(N 90 kg/hm², P 30 kg/hm²)、中肥(N 120 kg/hm², P 60 kg/hm²)和高肥(N 150 kg/hm², P 75 kg/hm²)4 种施肥水平下,模拟研究长武旱塬 1957~1998 年“春玉米→春玉米→冬小麦→冬小麦→冬小麦→冬小麦”轮作制的产量效应与土壤水分变化趋势,最大根深均设置为 4 m。其它田间管理措施同于当地冬小麦和春玉米田。在 42 年(1957~1998 年)期间,共完成 7

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 black loessial soil of Changwu highland in the WinEPIC model

项目 Item	土层编号 Layer number									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
土层厚度 Soil layer depth (m)	0.01	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
田间持水量 Field capacity (m/m)	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26
萎蔫系数 Wilting point (m/m)	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14
土壤容重 Buck density (g/cm ³)	1.30	1.30	1.31	1.31	1.32	1.32	1.33	1.33	1.33	1.33
pH	8.2	8.2	8.2	8.3	8.4	8.3	8.2	8.2	8.3	8.4
阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	9.6	9.6	9.9	12.2	8.6	9.7	6.5	4.5	3.5	2.0
碳酸钙含量 Calcium carbonate (%)	8.0	8.0	6.8	7.0	14.2	11.9	13.5	12.6	10.8	14.2
磷浓度 Phosphorus (mg/kg)	4.0	4.0	3.0	3.0	2.0	2.0	5.0	3.0	3.0	2.0
速效氮浓度 Initial nitrate (mg/kg)	30	50	50	40	30	20	20	0	0	0
有机氮含量 Organic N (mg/kg)	613	613	452	553	400	480	511	451	451	400
有机碳含量 Organic C (%)	0.62	0.62	0.45	0.55	0.45	0.58	0.41	0.45	0.45	0.4

表2 WinEPIC 模型中冬小麦和春玉米部分重要生长参数修订值

Table 2 Some important revised vegetal parameters of winter wheat and spring maize in the WinEPIC model

参数名称 Parameter names	参数取值 Parameter values		参数的意义 The meanings of parameters
CPNM	WW	SM	作物名称 Crop name
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 use 0.01 ~ 0.95)
TB	15.0	25.0	作物生长最适温度 Proper temperature for plant growth(°C)
TG	0.0	8.0	作物生长最低温度 Minimum temperature for plant growth(°C)
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 to decline (generally use 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 represent linearity (generally use 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 represent linearity (generally use 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	作物根系最大深度 Maximum root depth (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)°C 时, 作物生物量损失(小数点右面数值) % Frost damage parameters, number before the decimal = minimum temperature, number after the 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)°C 时, 作物生物量损失(小数点右面数值) % Frost damage parameters, number before the decimal = minimum temperature, number after the 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 emerge
RWPC2	0.20	0.20	成熟时根重系数 Root weight/biomass partitioning coefficient when maturate

注 (Note): WW—冬小麦 Winter wheat; SM—春玉米 Spring maize.

个轮作周期, 在输出的模拟结果中, 分析不同施肥处理下逐年作物产量、0—7 m 土层逐月土壤有效含水量和逐年 8 月 15 日 0—7 m 土层土壤湿度剖面分布

变化动态。

1.4 WinEPIC 模型模拟精度验证

李军等⁵利用长武试区长年定位试验数据分别

验证了冬小麦和春玉米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 ; 春玉米产量和玉米田 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 7.6% 和 -16.0% , 相关系数分别为 0.808 和 0.831 , 分别达到显著和极显著水平^[6]。表明 EPIC 模型能够较为准确的模拟冬小麦和春玉米连作条件下的产量变化和土壤水分动态。

本研究以地处长武旱塬的甘肃省平凉农科所高平试验站为试点 , 利用高平站长期连续定位试验数据验证 WinEPIC 模型对不同肥力水平下小麦—玉米轮作制的产量模拟精度。长武旱塬的小麦—玉米轮作方式为“春玉米→春玉米→冬小麦→冬小麦→冬小麦→冬小麦” , 在 3 个施肥处理水平下进行产量效应模拟精度验证 , 施肥处理分别为 : 1) 无肥处理 , 不施任何肥料(CK) ; 2) 氮处理 , 施 N 90 kg/hm²(N) ; 3) 氮磷处理 , 施 N 90 kg/hm²、P 30 kg/hm²(NP) , 肥料施用时间与当地大田管理相同。利用长武站 1957

~1998 年实时气象数据、黑垆土土壤数据和已经验证过的小麦和玉米参数 , 对小麦和玉米轮作制中的不同施肥处理进行模拟研究。

将 3 个处理的产量模拟值和观测值进行比较 (表 3、图 1) 以评价模型的精确性 ; 其中观测值为高平试验站长期定位试验中的春玉米和冬小麦产量^[4]。表 3 显示 , 在 1979 ~ 1996 年试验研究期间 , CK、N、NP 等 3 种施肥处理春玉米和冬小麦模拟产量平均值分别为 1.979、2.922、4.181 t/hm² , 相应的试验观测产量平均值分别为 1.914、2.782 和 4.360 t/hm² , 模拟值和实测值的相关系数分别为 0.864、0.886 和 0.818 , 均达到极显著水平 , 平均相对误差分别为 3.43%、5.03%、-4.10% , 模拟平方根误差 RMSE 分别为 0.837、0.868、1.195 t/hm²。

图 1 为 3 种施肥处理春玉米和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 模型可较为精确地模拟不同施肥处理下春玉米和冬小麦轮作产量 , 可用于黄土高原小麦和玉米轮作制的产量效应模拟研究。

表 3 长武旱塬不同施肥处理冬小麦和春玉米轮作产量模拟值与观测值的统计值比较

Table 3 Comparison of statistical values of simulated and observed yield of winter wheat and spring maize rotation under different fertilization treatments

项目 Item	CK			N			NP		
	模拟值 Simul. (t/hm ²)	观测值 Observ. (t/hm ²)	相对误差 Error (%)	模拟值 Simul. (t/hm ²)	观测值 Observ. (t/hm ²)	相对误差 Error (%)	模拟值 Simul. (t/hm ²)	观测值 Observ. (t/hm ²)	相对误差 Error (%)
平均值 Avg.	1.979	1.914	3.43	2.922	2.782	5.03	4.181	4.360	-4.10
RMSE		0.837			0.868			1.195	
回归方程 RE	y = 0.592 + 0.668x			y = 0.102 + 0.917x			y = 0.984 + 0.807x		
相关系数 CC	0.864**			0.886**			0.818**		

RE—Regression equation ; CC—Correlation index

2 结果分析

2.1 不同施肥处理下小麦玉米轮作的产量变化

在 1957 ~ 1998 年模拟研究的 42 年期间 (7 个轮作周期) , 无肥、低肥、中肥和高肥处理小麦玉米轮作的产量均呈现波动性下降趋势 (图 2) , 与轮作试验中观测值的降低趋势类似。在小麦玉米轮作产量变化曲线中 , 高峰多出现在与降水季节分布吻合程度较高的玉米种植年份 , 低谷则多为小麦种植年份。4 种施肥处理下产量变化范围分别为 0.056 ~ 5.801、0.118 ~ 8.928、0.181 ~ 8.946 和 0.202 ~ 9.338

t/hm² ; 平均值分别为 1.573、3.272、3.877 和 4.138 t/hm² ; 标准差分别为 1.452、1.971、1.991 和 2.137 t/hm² , 表现出随肥力水平提高产量波动幅度增大的趋势 ; 产量变异系数分别为 92.3%、60.2%、51.4% 和 51.6% , 无肥和低肥处理的产量稳定性低于中肥和高肥处理。4 种施肥处理间产量差异显著 , 低肥、中高肥和高肥处理分别较无肥处理增产 108.1%、146.5% 和 163.1%。在 42 年模拟时段内 4 种施肥处理产量最低值均出现在 1995 年 , 为冬小麦 ; 产量最高值除无肥处理为 1957 年的玉米外 , 其它 3 种处理均为 1959 年的小麦。

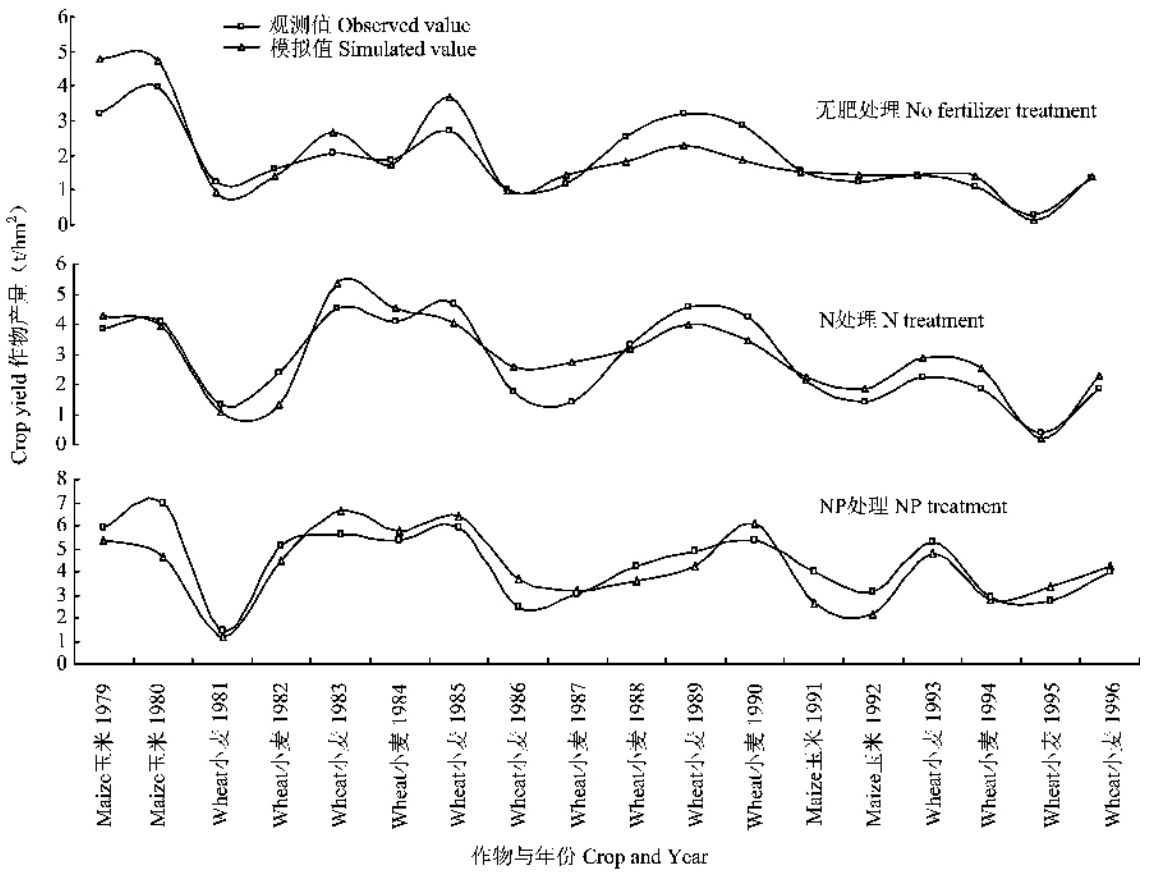


图 1 不同施肥处理下冬小麦—春玉米轮作产量模拟值与观测值的比较

Fig.1 Comparison of simulated and observed yield of winter wheat and spring maize rotation under different fertilization treatments

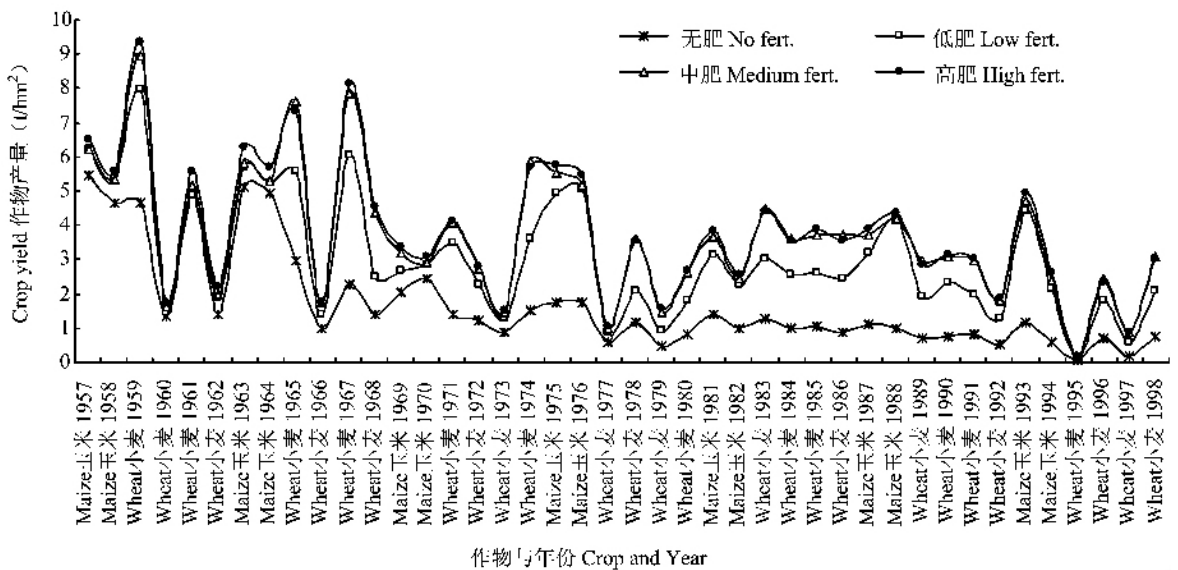


图 2 长武旱塬冬小麦—春玉米轮作制不同施肥处理下产量模拟值变化比较

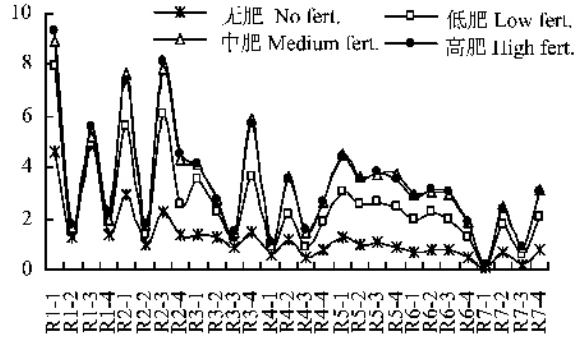
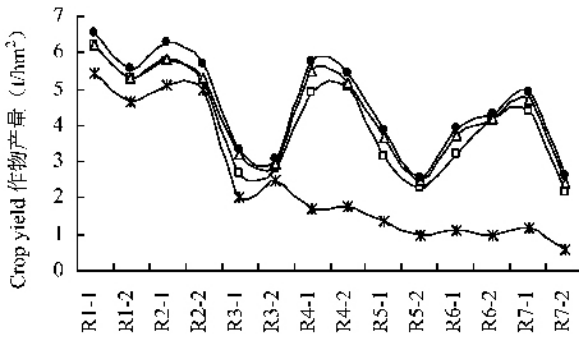
Fig.2 Comparison of winter wheat and spring maize yield in the rotation under different fertilization treatments at Changwu

若把玉米和小麦产量分开计算时,玉米和小麦产量(图3)均表现出波动性降低趋势,且以无肥处理产量降低幅度最大。在42年7个轮作周期中4个处理14年玉米产量平均值分别为2.334、4.159、4.356和4.613 t/hm²,无肥处理与低肥、中肥和高肥处理差异十分显著(图3);28年小麦产量平均值分别为1.192、2.829、3.637和3.901 t/hm²,无肥、低肥、中肥处理间差异十分显著,但中肥和高肥之间差异较小(图3)。2种作物相比,玉米产量平均值明显高于小麦。

2.2 不同施肥处理下小麦玉米轮作的干旱胁迫与氮素胁迫

在1957~1998年模拟研究期间,年降水量平均值为580 mm,其中前10年(1957~1966)平均值为597 mm,后10年(1989~1998)平均值为532 mm,后

期较前期年降水量减少65 mm。在42年期间,无肥、低肥、中肥和高肥处理年均干旱胁迫日数分别为19.6、24.1、26.4和28.7 d,标准差为17.9、20.3、20.9和21.5 d。其中,玉米干旱胁迫天数分别为13.1、14.1、17.2和21.1 d;小麦分别为22.8、28.7、30.9和32.8 d,小麦干旱胁迫程度较玉米严重。不同处理干旱胁迫日数变化趋势类似,且与年降水量变化趋势相反。在42年中,1960、1962、1966、1972、1973、1977、1980、1982、1992、1994、1995和1997等12年均严重干旱年型,干旱胁迫天数超过40 d(图4),其中1995年干旱胁迫天数最高,4种施肥处理分别为67、68、69和77 d。除1994年为春玉米外,其它严重干旱胁迫年份均为冬小麦,表明冬小麦较玉米容易遭受干旱威胁。



轮作周期与茬口 Crop rotation

图3 长武旱塬7个轮作周期中不同施肥处理下冬小麦产量和春玉米产量模拟值变化比较

Fig.3 Comparison of winter wheat yield and spring maize yield in 7 rotation periods under different fertilization treatments at Changwu

在42年模拟研究期间,4个施肥处理年均氮素胁迫天数分别为63.6、32.9、21.4和20.9 d,表现为随施肥量增加,氮素胁迫程度呈逐渐降低趋势;无肥、低肥与中肥和高肥处理之间差异显著,但中肥和高肥处理之间差异不明显,各施肥处理氮素胁迫天数均呈现出波动性上升趋势(图5)。其中,14年春玉米氮素胁迫天数平均值分别为28.4、2.5、0和0 d;28年冬小麦氮素胁迫天数平均值分别为81.2、48.1、32.1和31.3 d,冬小麦氮素胁迫程度明显较春玉米严重。表明冬小麦需氮量高于春玉米,在相同施氮量下,冬小麦容易遭受氮素胁迫危害。

2.3 不同施肥处理下小麦玉米轮作田土壤有效含水量变化

在1957~1998年的42年模拟研究期间,4个施

肥处理0—7 m土层逐月土壤有效含水量模拟值分别在399~791、294~791、182~791和182~791 mm范围内波动,其平均值分别为488、398、303和306 mm,标准差分别为65、82、103和104 mm,变异系数分别为13.2%、20.6%、34.1%和34.1%。无肥、低肥和中肥处理间差异十分显著;但中肥和高肥处理间差异很小,肥力越高,土壤含水量越低,年度和季节变幅越大(图6)。

随着年度和季节降水量变化,各施肥处理逐月土壤有效含水量均呈现波动性降低趋势(图6)。在干旱年份和小麦、玉米生长旺盛期呈现逐渐下降趋势,而在多雨年份和夏闲期得到降水补充和恢复提高。通常以每年5~8月份土壤含水量较低,而9月至翌年4月土壤含水量较高;在一些干旱年份的6

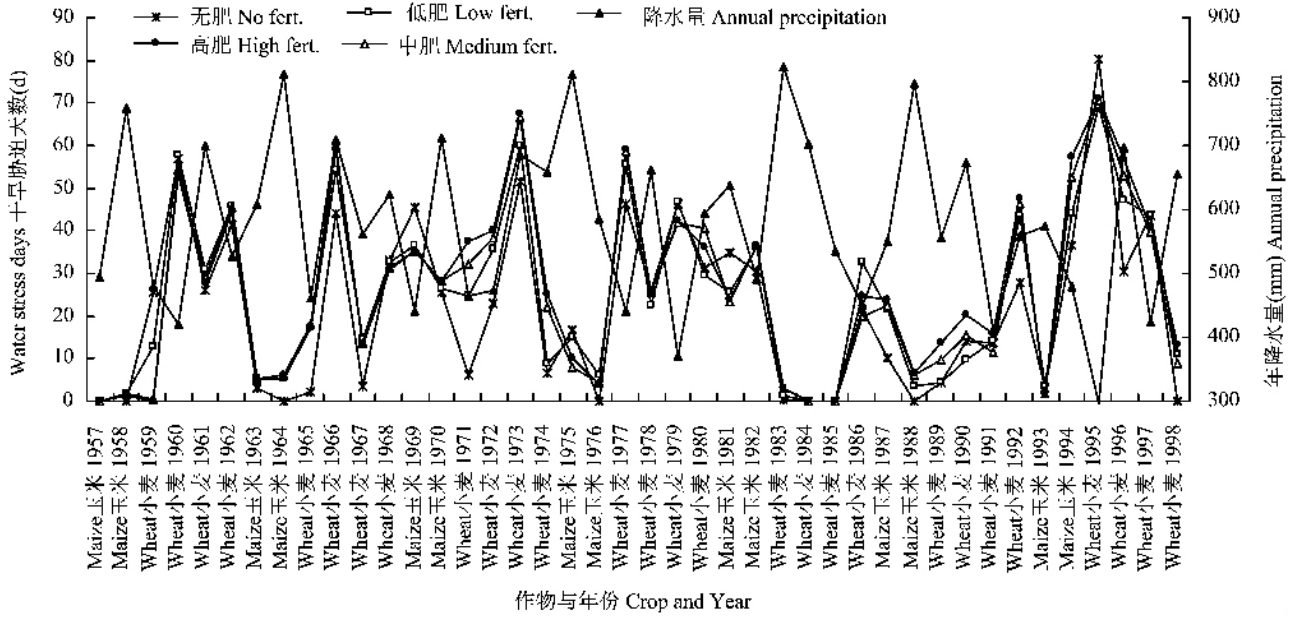


图 4 长武旱塬年降水量、不同施肥处理下冬小麦与玉米干旱胁迫天数比较

Fig.4 Annual rainfall , simulated soil water stress days during winter wheat and spring maize rotation periods under different fertilization treatments at Changwu

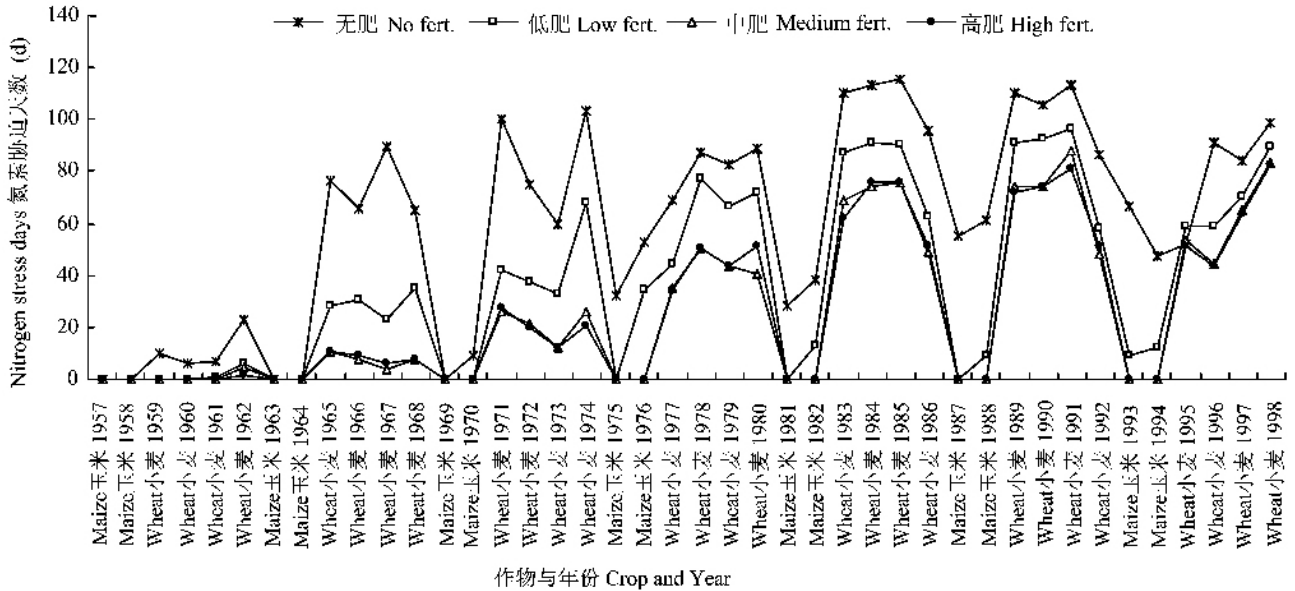


图 5 长武旱塬轮作周期中不同施肥处理下冬小麦与玉米氮素胁迫天数比较

Fig.5 Simulated nitrogen stress days during winter wheat and spring maize rotation periods under different fertilization treatments at Changwu

~8 月份,中肥和高肥处理 0—7 m 土层土壤有效含水量接近于 200 mm,发生了较为严重的季节性土壤干燥化。无肥、低肥、中肥和高肥处理在模拟初期土壤有效含水量均为 791 mm,但模拟结束时则分别为 435、357、273 和 287 mm;42 年期间土壤有效含水量分别减少 357、434、518 和 504 mm,平均每年减少

8.5、10.3、12.3 和 12.0 mm。中、高肥处理土壤干燥化速度快于无肥和低肥处理,与无肥处理相比,低肥、中肥和高肥处理多消耗土壤水分 89、185 和 182 mm。长时段模拟结果表明,由于年度降水量的趋势性减少和中、高施肥处理作物耗水量增加,导致了旱塬地土壤干燥化趋势显现。

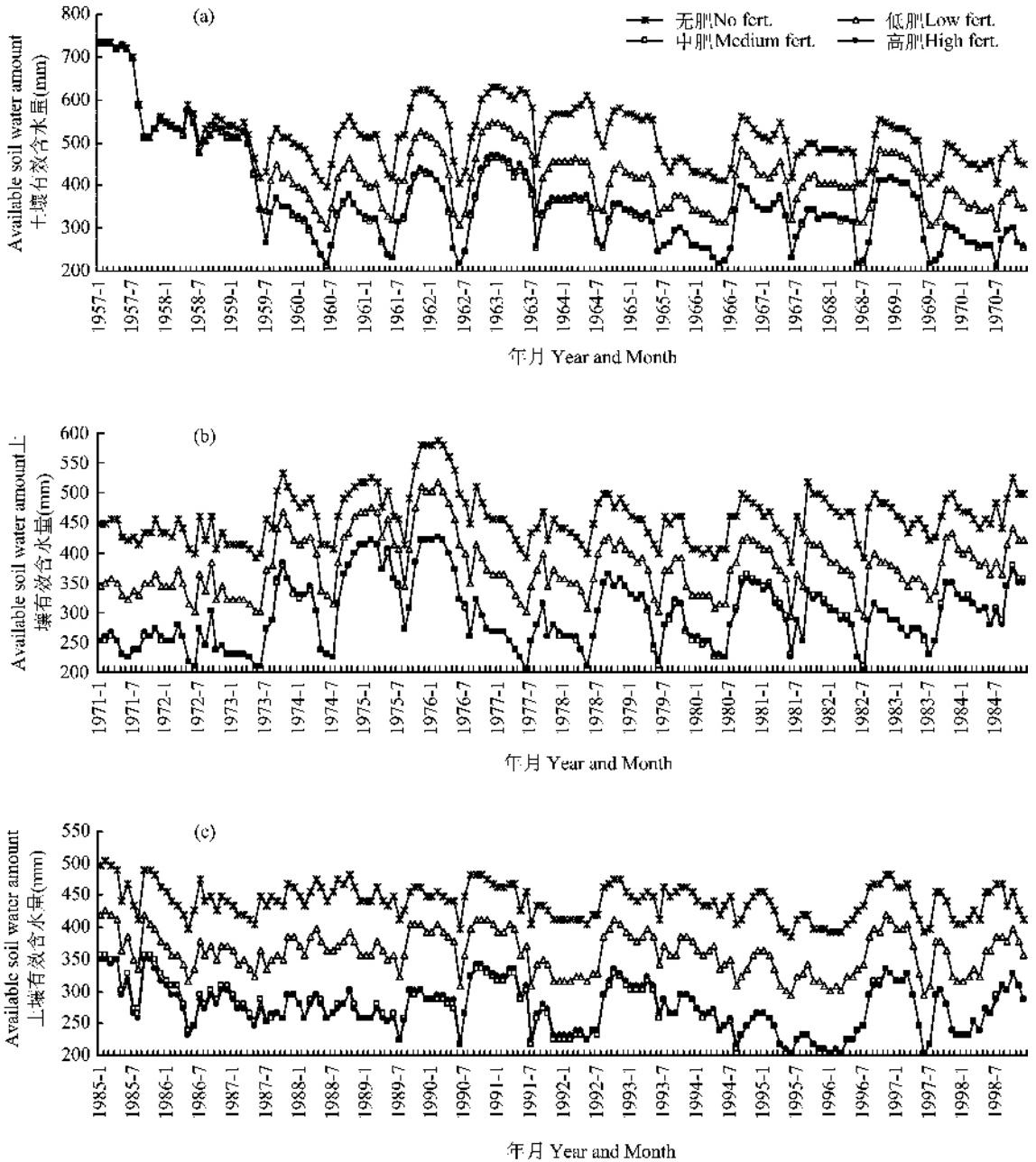


图 6 长武旱塬小麦—玉米轮作周期中不同施肥处理下 0—7 m 土层逐月土壤有效含水量模拟值变化动态

Fig. 6 Simulated monthly available soil water amount changes in 0—7 m soil layers during winter wheat and spring maize rotation periods under different fertilization treatments at Changwu

2.4 小麦玉米轮作田土壤湿度剖面分布变化

在 1957~1998 年的 42 年轮作模拟中,将轮作初期(第 1 轮作周期 1957~1962)、中期(第 4 轮作周期 1975~1980)和末期(第 7 轮作周期 1993~1998)逐年土壤湿度剖面分布变化列于图 7。

和模拟初期的 1956 年相比,4 个肥料处理均在第 1 个轮作周期内(第 1—6 年)出现了土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的过程;至第 4 个轮作周期(第 19—24 年)结束时,土壤湿度剖面分布已经

基本稳定。无肥、低肥、中肥、高肥处理分别只有 0—3 m 土层土壤湿度发生年际变化,3 m 以下深层土壤湿度接近稳定状态,至第 7 个轮作周期(第 37—42 年)各施肥处理 2 m 以下土层土壤湿度呈现完全稳定状态,已不随降水发生年度变化。作物对土壤水分利用最大深度,无肥、低肥、中肥和高肥处理分别超过了 3、4、5 和 5 m。高肥和中肥处理土壤湿度明显低于低肥,低肥又低于无肥处理。无肥和低肥处理土壤干层分布于 2—3 m 和 2—4 m 土层,

中肥和高肥处理均分布于 2—5 m 土层。表明在黄土高原南部半湿润旱塬地,随着肥力水平和作物产

量水平的提高,作物耗水量增加,土壤干燥化程度加剧,土壤干层厚度加深。

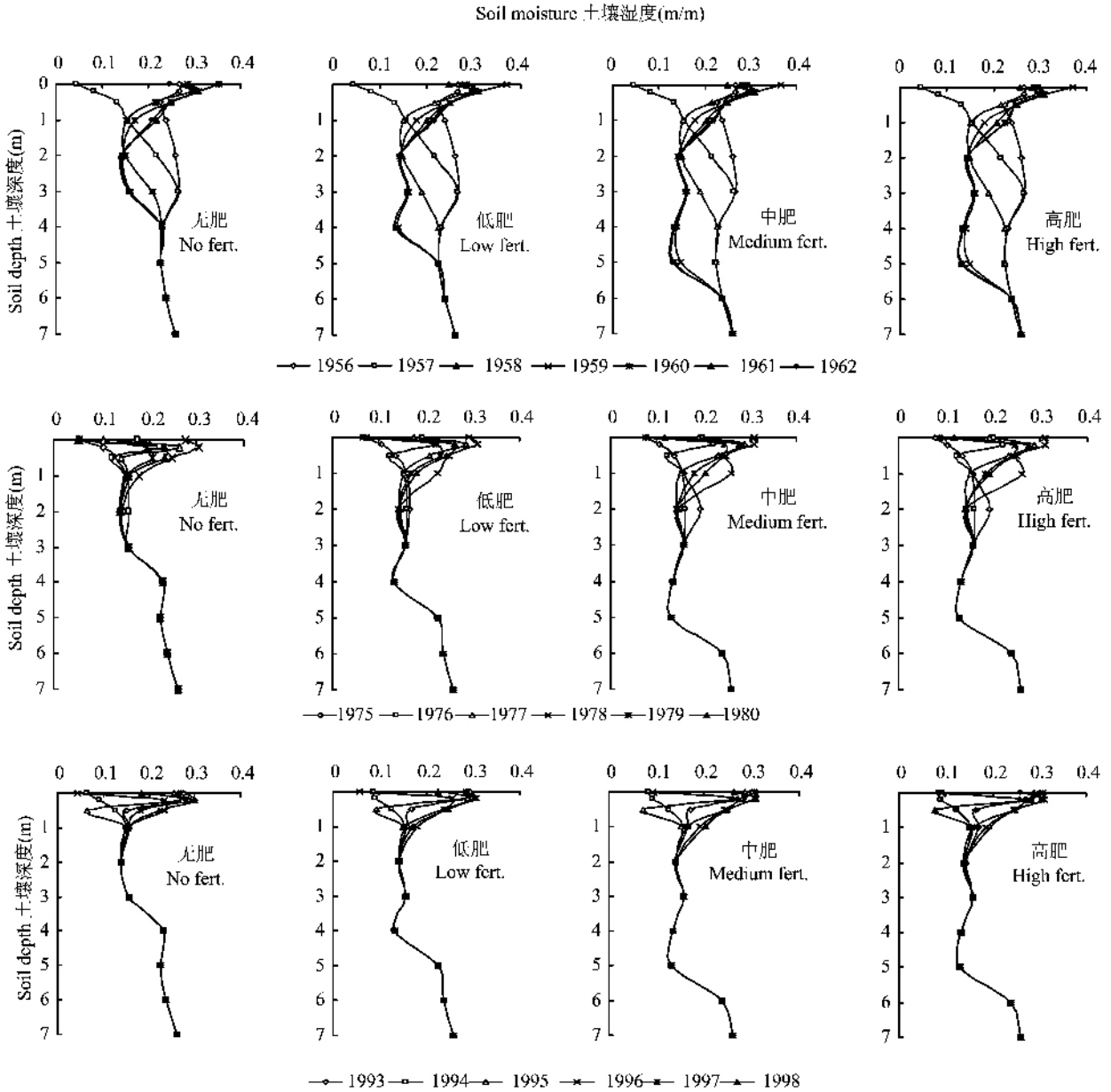


图 7 长武旱塬小麦—玉米轮作初期、中期和末期不同施肥处理土壤湿度剖面分布变化比较

Fig.7 Comparison of soil moisture distribution changes in 0-7m soil profile at beginning, middle and end of winter wheat and spring maize rotation under different fertilization treatments at Changwu

3 结论

1) 利用 WinEPIC 模型模拟研究了黄土高原(长武)旱塬地不同施肥处理下小麦玉米轮作的产量效应,CK、N、NP 处理模拟值与观测值之间的平均误差分别为 3.43%、5.03%、-4.10%,表明 WinEPIC 模型对不同施肥处理下小麦玉米轮作中冬小麦和春玉

米子粒产量较为准确,适用于黄土高原小麦玉米轮作系统的模拟研究。但模型中存在不能对模拟初期的土壤湿度状态进行人为设定,而由模型根据土壤水分性质和降水量自动产生,难以对不同初始含水量下的土壤水分动态进行模拟研究;以及模型对土壤剖面分层数目限于 10 层,对 0—7 m 的剖面深层土壤湿度状况描述还不够细致等不足。

2) 在 1957~1998 年模拟研究期间,在无肥、低肥、中肥和高肥等 4 种施肥水平下“春玉米→春玉米→冬小麦→冬小麦→冬小麦→冬小麦”轮作方式的产量均呈现显著的波动性下降趋势,其平均值分别为 1.573、3.272、3.877 和 4.138 t/hm²,以低肥和中肥处理增产效果最好。说明旱塬地小麦玉米轮作中适宜的施肥量范围为 N 90~120 kg/hm²、P 30~60 kg/hm²。42 年的模拟结果表明,冬小麦较春玉米易受干旱胁迫,其需氮量也明显高于春玉米,春玉米的高产稳产性优于冬小麦。

3) 无肥、低肥、中肥和高肥处理下小麦玉米轮作逐月土壤有效含水量均呈现波动性降低趋势,平均每年分别减少 8.5、10.3、12.3 和 12.0 mm。无肥、低肥和中肥处理间土壤有效含水量差异十分显著,但中肥和高肥处理间差异不明显。肥力越高,作物耗水量越大,土壤有效含水量越低。

4) 4 种施肥处理下小麦玉米轮作期间 0—7 m 土层土壤湿度剖面分布,均在模拟初期出现了土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的干燥化过程,在模拟中后期均出现了稳定的土壤干层,无肥和低肥处理土壤干层分布于 2—3 m 和 2—4 m 土层,中肥和高肥处理均分布于 2—5 m 土层。随着肥力和作物产量水平的提高,土壤干层厚度加深。

参 考 文 献:

- [1] 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.
Hao M D, Wang X G, Dang T H *et al.* Analysis of long term fertilization effect on yield of wheat in dry land on loess plateau[J]. Acta Agron. Sin., 2004, 22(3): 1108-1102.
- [2] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353-356.
Li Y S. Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of the soil on dryland[J]. Acta Pedol. Sin., 2001, 38(3): 353-356.
- [3] 黄明斌,党廷辉,李玉山. 黄土区旱塬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.
Huang M H, Dang T H, Li Y S. Effect of advanced productivity in dryland farming of the loess plateau on soil water cycle[J]. Trans. CSAE, 2002, 18(6): 50-54.
- [4] 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.
Fan T L, Zhou G Y, Wang Y *et al.* Long-term fertilization on yield increase of winter wheat-maize rotation system in Loess Plateau dryland of Gansu[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(2): 127-131.
- [5] 李军,邵明安,张兴昌. 黄土高原旱塬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.
Li J, Shao M A, Zhang X C. Simulation of water potential productivity of winter wheat and soil water dynamics on rainfed highland of the Loess Plateau[J]. J. Nat. Resour., 2004, 19(16): 738-745.
- [6] 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): 45-48.
Li J, Shao M A, Zhang X C *et al.* Simulation of soil desiccation and yield fluctuate of high yield maize field on rainfed highland of the Loess Plateau[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2007, 15(2): 45-48.
- [7] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, Spalton D A. The EPIC crop growth mode[J]. Trans. ASAE, 1989, 32(2): 475-511.
- [8] Williams J R, Dyke P T, Fuchs W W *et al.* EPIC-erosion/productivity impact calculator: 2. User manual[M]. Texas: USDA Agric. Tech. Bull. No. 1768, 1990.
- [9] Texas A&M Blackland Research Center. Researcher's guide to WinEPIC, Version 1.0. BRC report No. 0406[M]. Texas: Texas A&M Blackland Research Center, 2004.
- [10] 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.
The National Soil Survey and Investigation Office. Records of Chinese soil survey (vol. 5)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995. 244-254.
- [11] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Shaanxi Province Soil Survey and Investigation Office. Soils of Shaanxi province[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [12] 李军,邵明安,张兴昌. 黄土高原地区 EPIC 模型数据库组建[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 21-26.
Li J, Shao M A, Zhang X C. Simulation equations for soil water transfer and crop use in the EPIC mode[J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For. (Nat. Sci. Ed.) 2004, 32(8): 21-26.
- [13] 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.
Li J, Shao M A, Zhang X C. Simulation equations for soil nitrogen and phosphorus transfer and crop nutrition in the EPIC model[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(2): 166-173.