

不同施肥水平下宝鸡旱塬连作冬小麦产量与 深层土壤水分效应的模拟研究

蒋斌^{1a}, 李军^{1b,2}, 王学春^{1b}, 胡伟^{1b}

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院 b 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】【目的】探寻与黄土高原半湿润区降水状况相适应的、有利于土壤水分可持续利用的合理施肥水平, 为当地小麦生产的可持续发展提供科学依据。【方法】在模拟精度验证的基础上, 应用侵蚀和生产力影响计算模型(WinEPIC模型)模拟研究了黄土高原半湿润区宝鸡旱塬1961~2000年无肥(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)、高肥(N 150 kg/hm², P 75 kg/hm²)和超高(N 180 kg/hm², P 90 kg/hm²)肥力处理5种施肥水平下, 连作冬小麦的产量变化和深层土壤的水分效应。【结果】无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理下1961~2000年宝鸡旱塬冬小麦的产量均呈波动性降低的趋势, 其平均值分别为1.588, 2.306, 3.327, 3.981和4.764 t/hm²; 连作冬小麦逐月土壤有效含水量也均呈波动性降低趋势, 5种施肥处理的年均土壤干燥化速率分别为11.4, 11.6, 14.9, 14.9和18.2 mm/a。在5种施肥条件下, 模拟期间均出现了土壤干燥化现象, 在5~16年都形成了相对稳定的土壤干层, 其中无肥和低肥处理的土壤干层分布于2~3 m土层, 中肥和高肥处理分布于2~4 m土层, 超高肥处理分布于2~5 m土层。【结论】随肥力和作物产量水平的提高, 作物耗水量增大, 土壤干层厚度逐渐加深。宝鸡旱塬连作冬小麦适宜的施肥量为N 120~150 kg/hm², P 60~75 kg/hm²。

【关键词】 宝鸡旱塬; 冬小麦; WinEPIC模型; 施肥水平; 小麦产量; 土壤水分

【中图分类号】 S152.7

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2008)08-0073-11

Simulation of yield and deep soil water effects of winter wheat field under different fertilization levels in Baoji dry-land of the Loess Plateau

JIANG Bin^{1a}, LI Jun^{1b,2}, WANG Xue-chun^{1b}, HU Wei^{1b}

(1 a College of Resources Environment, b 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: 【Objective】 The experiment was to provide scientific basis for sustainable development of local wheat production, which was fit for the fertilization levels adaptive to precipitation condition of the semi-humid area of Loess Plateau as well as beneficial to soil water sustainable utilization. 【Method】 Based on model validation, the WinEPIC model was used to simulate yield and deep soil water effects of continuous winter wheat under 5 fertilization treatments in Baoji semi-humid area of the Loess Plateau. 【Result】

* [收稿日期] 2007-09-17

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30471024, 30771280, 40371077); 黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室开放基金项目(10501-180)

[作者简介] 蒋斌(1983-), 男, 重庆江津人, 在读硕士, 主要从事作物生产系统模拟与决策研究。

E-mail: maxkiller@nwsuaf.edu.cn

[通讯作者] 李军(1964-), 男, 甘肃泾川人, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区农业生态与高效农作制度及作物生产系统模拟与决策研究。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

Grain yield of the continuous winter wheat under no fertilization, low fertilization, medium fertilization and high fertilization treatment decreased significantly with fluctuation, average yield was 1.588, 2.306, 3.327, 3.981 and 4.764 t/hm² respectively; Simulated monthly available soil water content of all 5 fertilization treatments declined with annual and seasonal fluctuations, average annual soil desiccated rate was 11.4, 11.6, 14.9, 14.9 and 18.2 mm/a respectively; soil desiccation and stable desiccated soil layers of all 5 fertilization treatments occurred after 5—16 years of continuous cropping simulation. Distribution depth of dried soil layers was 2—3 m of no fertilization and low fertilization treatment, 2—4 m of medium and high fertilization treatments, 2—5 m of superhigh fertilization treatment respectively. 【Conclusion】 As fertilization and crop yield increased, dried soil layers were thickened and crops water consumption was increased. The suitable fertilization level of Baoji dry-land was N 120—150 kg/hm², P 60—75 kg/hm².

Key words: Baoji dry-land; winter wheat; WinEPIC model; fertilization level; grain yield; soil water

冬小麦是黄土高原半湿润区旱源地的主要粮食作物之一^[1],随着化肥施用水平的提高,冬小麦产量也在不断提高。目前,对通过施肥提高冬小麦产量的相关研究较多^[2-3],但对该地区高产麦田深层土壤水分利用规律缺乏详细研究。在黄土高原半湿润和半干旱区,高产麦田土壤干燥化问题已经受到有关专家的关注^[4-5],但在南部降水量较高的宝鸡旱源地区,对麦田是否会发生持续的土壤干燥化及不同施肥水平下高、中、低产麦田产量和深层土壤水分动态变化等问题仍缺乏定量研究。李军等^[1]对渭北旱源冬小麦连作条件下的水分生产潜力和根层土壤水分动态进行了初步模拟研究。本研究进一步对宝鸡旱源地不同施肥水平下连作冬小麦田产量的波动性和土壤干燥化过程进行了定量研究,分析了不同施肥水平下半湿润区连作冬小麦产量的变化趋势和土壤干燥化规律,以期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,为黄土高原半湿润区旱地小麦生产的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

本研究借助侵蚀和生产力影响计算模型(WinEPIC),以陕西的宝鸡地区为试点,采用定位观测资料进行模型参数修订和模拟精度验证,定量模拟研究了黄土高原半湿润区旱地不同施肥水平下连作冬小麦产量的变化趋势和深层土壤水分的变化动态。

1.1 WinEPIC 模型简介

WinEPIC 又称为环境政策综合气候模型(Environmental policy-integrated climate model),是美国建立的定量评价“气候—土壤—作物—管理”综合连续系统的动力学模型,能够以天为时间步长模拟农田水土资源和作物生产力的动态变化,可用来评

价农田作物生产力和水土资源管理策略的效果^[6-7]。EPIC 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^[8-9]。EPIC 模型中的作物生长模型是一个多作物通用模型,其根据各种作物生理生态过程的共性研制模型的主体框架,再结合不同作物的生长参数和田间管理措施分别进行各种作物的生长模拟,可进行几十年至上百年的作物生产力模拟试验研究。EPIC 模型对土壤水分动力学的描述较为详细,通过描述降水(包括灌溉水)入渗、径流、再分布、土壤水分蒸发和植物吸收蒸腾等环节来描述根层土壤水分的平衡状况,定量描述土壤水分动态变化及其对产量的影响^[8]。本研究所采用的 WinEPIC 3060,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的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^[8]。

1.2 模型数据库的组建

1.2.1 气象数据库的建立 气象数据库组建内容包括气象站基本信息、逐日气象数据和逐月统计气象要素等。将收集到的宝鸡站 1955~2000 年共 46 年的气象数据(包括历年各月逐日太阳辐射、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速、风向等),在 Excel 中按照 EPIC 模型要求转变为特殊的文本格式,导入模型气象数据库中,建成逐日实时气象数据库^[10],用于实际时段的模拟研究。本试验对宝鸡连作冬小麦进行 1961~2000 年的预测模拟研究。

1.2.2 土壤数据库的数据输入 EPIC 模型运行所需要的土壤剖面的理化性状数据主要包括:试验区代表地形资料(包括坡度、坡向、坡长等)、土层厚度

(m)、容重(烘干重 t/m^3)、凋萎湿度(m/m)、田间持水量(m/m)、砂粒含量(%)、粉粒含量(%),有机氮含量(g/t)、pH 值、离子总量(cmol/kg)、有机碳含量(g/kg)、 $CaCO_3$ 含量(%)、阳离子代换量(cmol/kg)、粗砾含量(%)、硝态氮含量(mg/kg)、速效磷含量(mg/kg)、作物残茬(t/hm^2)、土壤比重、磷素吸附率、饱和导水率、地下水平流运转时间和有机

磷含量等 20 多项。本研究所用的黑垆土 0~7 m 土层土壤剖面各项理化性状参数(表 1)来源于《中国土种志》^[11-12]。其中,模型中如凋萎系数、田间持水量等水分含量(m/m)是用土壤含水量换算而得,即:水分含量(m/m)=土壤含水量(重量)(%) \times 土壤容重(t/m^3)。单位 m/m 为国外模拟研究中土壤水分的通用单位^[1]。

表 1 WinEPIC 模型中宝鸡旱源黑垆土的部分重要理化参数

Table 1 Some important physical and chemical parameters for Heilu Soil of Baoji dry-land 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/m Soil layer depth	0.01	0.20	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
田间持水量/($m \cdot m^{-1}$) Field capacity	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.31
萎蔫系数/($m \cdot m^{-1}$) Wilting point	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12
土壤容重/($g \cdot cm^{-3}$) Bulk density	1.15	1.15	1.28	1.33	1.32	1.34	1.34	1.35	1.33	1.34
pH	8.20	8.50	8.40	8.50	8.40	8.50	8.60	8.60	8.60	8.60
阳离子交换量/(cmol $\cdot kg^{-1}$) Cation exchange cap	10.40	10.90	13.40	14.50	13.80	9.70	6.50	4.50	3.50	2.00
碳酸钙含量/($g \cdot kg^{-1}$) Calcium carbonate	117.00	117.00	117.00	117.00	117.00	116.00	117.00	117.00	117.00	117.00
磷含量/(mg $\cdot kg^{-1}$) Phosphorus	4.00	4.00	3.00	3.00	2.00	2.00	5.00	3.00	3.00	2.00
速效氮含量/(mg $\cdot kg^{-1}$) Initial nitrate concentration	30.00	32.00	28.00	31.00	29.00	32.00	40.00	40.00	15.00	16.00
有机氮含量/(mg $\cdot kg^{-1}$) Organic nitrogen	370.00	350.00	380.00	360.00	370.00	380.00	380.00	390.00	0.00	0.00
有机碳含量/($g \cdot kg^{-1}$) Organic carbon	6.20	12.10	8.20	3.80	3.50	3.30	3.10	2.10	2.00	1.00

1.2.3 作物参数的输入 WinEPIC 模型作物参数数据库中的每种作物都有惟一的生理生态参数集,包括光能转化效率、经济系数、最佳和最低生长温度、最大叶面积系数、叶面积变化曲线参数、最大植株高度与根深、氮磷钾吸收率和水分胁迫因子等 17 项指标。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、氮素和磷素对生物量积累和经济产量的影响。本研究根据相关文献和实测数据,对宝鸡地区冬小麦的最大叶面积系数、最低生长温度、最适生长温度、最大株高和最大根深等 39 个生理生态参数进行了设定^[10],表 2 为 WinEPIC 模型中冬小麦部分重要生长参数的修订值。

1.3 模拟试验处理

本试验模型所采用的实测产量数据为陕西杨凌西北农林科技大学乾县试验区冬小麦长期定位试验数据^[13]。数据整理时,以乾县冬小麦生产年度为单位(每年的 7 月中旬土壤休闲期至次年的 6 月上旬冬小麦成熟)进行统计,以每月 15 日土壤水分数据

代表该月的土壤水分,以每年 9 月 15 日土壤水分数据代表该年的土壤水分数据。为了比较不同肥力水平下冬小麦产量和土壤水分的变化情况,在广泛调查的基础上,设定了 5 种施肥处理:无肥(N 0 kg/hm^2 , P 0 kg/hm^2)、低肥(N 90 kg/hm^2 , P 30 kg/hm^2)、中肥(N 120 kg/hm^2 , P 60 kg/hm^2)、高肥(N 150 kg/hm^2 , P 75 kg/hm^2)和超高肥力(N 180 kg/hm^2 , P 90 kg/hm^2)处理,肥料施用时间与大田相同。

2 WinEPIC 模型模拟精度验证

在黄土高原应用 EPIC 模型之前,需要对模型的模拟效果和精度进行验证。李军等^[1]利用长武县试验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,结果显示,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,表明 EPIC 模型能够较为准确地模拟冬小麦连作条件下的产量变化和土壤水分动态。

表 2 WinEPIC 模型中冬小麦部分重要生长参数的修订值

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

参数名称 Parameter	参数的意义 Meaning of parameters	参数取值 Parameter value
CPNM	作物名称 Crop Name	Winter wheat
WA	潜在生物量-能量比率/(t·hm ⁻² ·MJ ⁻¹) Energy to biomass conversion factor	30.00
HI	收获指数 Harvest efficiency	0.40
TB	作物生长最适温度/℃ Plant growth	15.00
TG	作物生长最低温度/℃ Minimum temperature for plant growth	0.00
DMLA	最大潜在叶面积系数 Maximum leaf area index	6.00
DLAI	播种至作物叶面积系数最大时的时间占整个生长期的比率 Fraction of growing season when leaf area index starts declining	0.91
RLAD	叶面积下降参数 Leaf-area-index decline rate parameter	1.00
RBMD	生物量-能量转换比率 Biomass-energy ratio decline rate parameter	1.00
GSI	最大气孔导度/(m·s ⁻¹) Maximum stomatal conductance	0.01
HMX	最大株高/m Maximum planting height	1.20
RDMX	最大根系分布深度/m Maximum root depth	4.00
FRST1	生物量遭受霜冻曲线参数,当温度为-15℃时,作物生物量损失/% Fraction lost when given minimum temperature is experienced	15.20
FRST2	生物量遭受霜冻曲线参数,当温度为-25℃时,作物生物量损失/% Fraction lost when given minimum temperature is experienced(2)	25.40
RWPC1	出苗时根重系数 Root weight/biomass partitioning coefficient	0.40
RWPC2	成熟时根重系数 Root weight/biomass partitioning coefficient(2)	0.20

本研究以乾县为试验点,对低等肥力水平(施纯氮 90 kg/hm²、纯磷 30 kg/hm²)下的冬小麦产量进行了模拟验证,肥料施用时间与当地大田管理相同。将模拟产量与实测产量进行比较,计算模拟平方根误差(RMSE),以评价模型的精确性。RMSE 是国际上作物模型验证与参数修订时常用的模拟值与观测值比较的统计参数,其值越小,表明模拟值与观测值的一致性越好,模型模拟结果的精确性和可靠性越高^[1]。RMSE 采用下式计算:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}}$$

式中:OBS_i 为观测值;SIM_i 为模拟值;n 为样本数。

表 3 1988~2000 年乾县冬小麦产量模拟值与观测值的比较

Table 3 Comparison for statistic values of simulated and observed wheat yield in Qianxian during 1988-2000

项目 Item	模拟值/ (t·hm ⁻²) Simulated	观测值/ (t·hm ⁻²) Observed	相对误差/% Difference
平均值 Mean	4.332	4.325	16.9
标准差 Standard deviation	0.815	1.313	-37.9
RMSE		0.837	
回归方程 Regression equation		y = -1.564 + 1.359x	
相关系数 Correlation index		0.843**	

注:相关系数达到 0.553 为显著,达到 0.684 为极显著。

Note:It was significant and exceeding significant when correlation index reached 0.553 and 0.684 separately.

表 3 数据显示,在 1988~2000 年,试验区冬小麦模拟产量多年平均值为 4.332 t/hm²,实测产量多年平均值分别为 4.325 t/hm²,相关系数为 0.843,达到极显著水平,平均相对误差为 16.9%,RMSE 为 0.837 t/hm²。

模拟产量与观测产量的统计结果和动态变化情况见图 1。由图 1 可知,冬小麦产量模拟值与观测值逐年变化曲线的变化趋势相似。表明 EPIC 模型可以较为精确地模拟连作条件下的冬小麦产量,可用于本地区冬小麦的产量模拟。

3 结果与分析

3.1 宝鸡年降水量和连作冬小麦生育期降水量的变化特征

宝鸡地区 1961~2000 年 40 年降水量为 378.3~948.6 mm,平均 659.8 mm,标准差为 134.6 mm,变异系数为 20.3%。其中 1995 年降水量仅 378.3 mm,占平均值的 55.9%。前 10 年(1961~1970)降雨量平均值为 703.2 mm,后 10 年降雨量(1991~2000)平均值为 585.6 mm,较前 10 年年降水量减少了 117.6 mm,40 年降水量呈现波动性下降趋势(图 2)。将 1961~2000 年划分为干旱年、平水年和丰水年 3 种降水年型,则 1969,1977,1979,1985,1994,1995,1997 年为干旱年型,降水量不足 550 mm,其中 1995,1997 年为特大干旱年型,降水量不足 400 mm;1962,1965,1966,1971,1972~

1974, 1982, 1985~1987, 1991, 1993, 1996, 1999, 2000 年为平水年型, 降水量为 550~700 mm; 1961, 1963, 1967, 1976, 1978, 1980, 1988~1990, 1992, 1998 年为丰水年型, 降水量为 700~800 mm, 其中 1964, 1968, 1975, 1981, 1983~1984 年为特大丰水年型, 降水量超过 800 mm。

宝鸡地区 1961~2000 年 40 年冬小麦生育期内的降水量为 179.9~374.2 mm, 平均值为 272.8

mm, 标准差为 51.2 mm, 变异系数为 18.7%, 前 10 年(1961~1970)冬小麦生育期内降水量平均为 302.2 mm, 后 10 年(1991~2000)冬小麦生育期内降水量平均为 255.5 mm, 较前 10 年减少了 46.7 mm。40 年生育期内降水量呈现波动性下降趋势(图 2)。虽然宝鸡旱塬的平均降水量相对较大, 但是冬小麦生育期内的降水量却相对较少, 这对冬小麦的产量及其所遭受的干旱胁迫程度都有很大的影响。

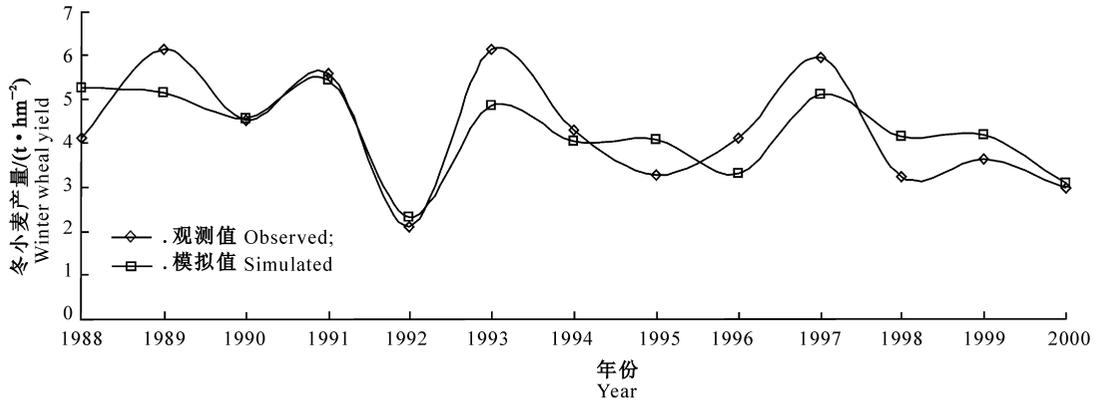


图 1 乾县低等施肥水平下连作冬小麦产量模拟值与观测值的比较

Fig. 1 Comparison between simulated and observed yield of continuous winter wheat under low fertilization level in Qianxian

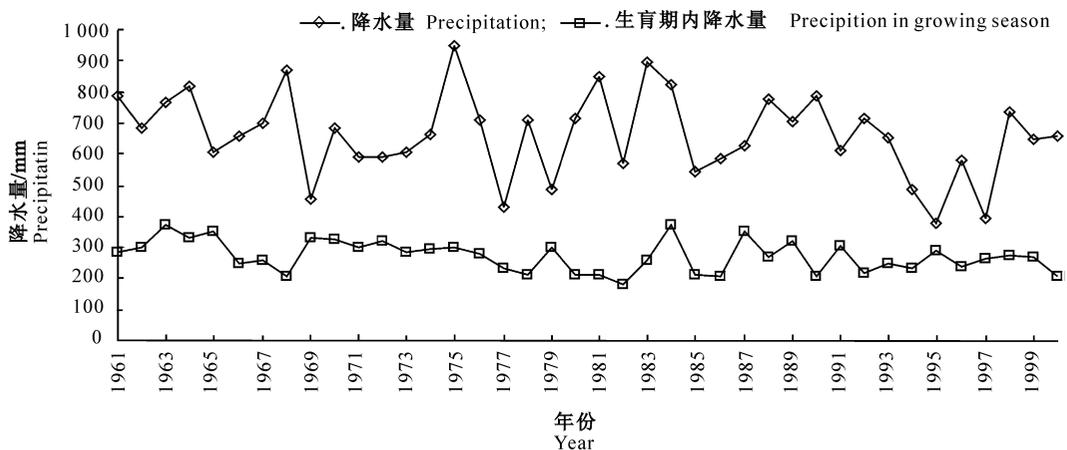


图 2 宝鸡旱塬 1961~2000 年降水量和冬小麦生育期降水量的变化

Fig. 2 Annual Precipitation and Growing season precipitation of winter wheat at Baoji dry-land during 1961-2000

3.2 不同施肥水平下宝鸡连作冬小麦模拟产量的变化

图 3 显示, 1961~2000 年宝鸡旱塬无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理冬小麦连作的模拟产量均随着年降水量的变化而呈现波动性下降趋势。无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥 5 种处理连作冬小麦产量的变化范围分别为 0.256~4.084, 0.67~5.238, 1.349~7.043, 1.945~7.863 和 2.323~

8.387 t/hm², 平均分别为 1.588, 2.306, 3.327, 3.981 和 4.764 t/hm², 标准差分别为 1.097, 1.292, 1.633, 1.668 和 1.649 t/hm², 变异系数分别为 69.1%, 56.0%, 49.1%, 41.9% 和 34.6%。5 种施肥处理间连作冬小麦产量差异明显, 低肥、中肥、高肥和超高肥处理分别较无肥处理增产 45.2%, 100.2%, 150.6% 和 199.9%, 表明随肥力水平提高, 产量波动幅度增大。在 40 年模拟时段内, 各施

肥处理的小麦产量均有大幅度的减产,无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理前 10 年(1961~1970)的平均产量依次为 3.237,4.238,5.799,6.478 和 7.123

t/hm^2 ,后 10 年(1991~2000)的平均产量为 0.708,1.349,2.118,2.799 和 3.390 t/hm^2 ,分别减产 78.1%,68.2%,63.4%,57.3% 和 52.4%。

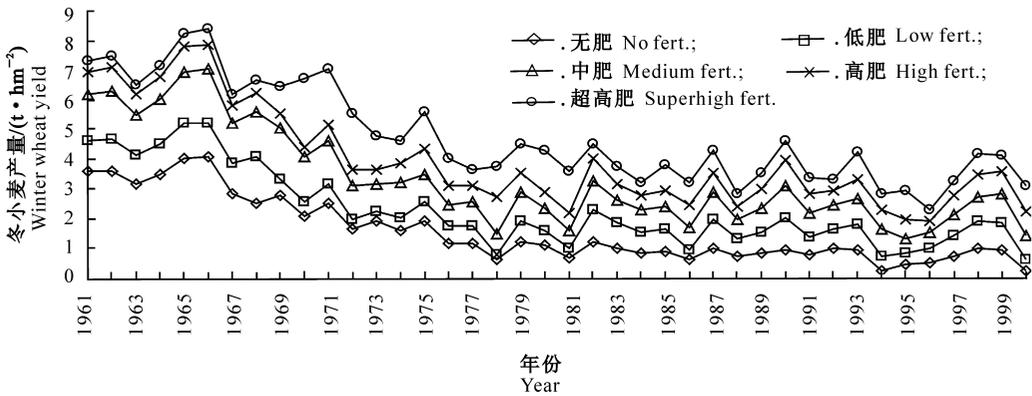


图 3 1961~2000 年不同施肥水平下宝鸡旱塬连作冬小麦产量模拟值的变化

Fig. 3 Changes of simulated winter wheat yield of winter wheat continuous cropping under different fertilization levels in Baoji dry-land during 1961—2000

3.3 不同施肥水平下宝鸡连作小麦干旱胁迫与氮素胁迫的模拟时间

在 1961~2000 年,无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理生育期模拟干旱胁迫时间分别介于 0~18,0~36,0~41,0~50 和 0~53 d,年均干旱胁迫时间分别为 1.4,4.4,6.3,11.3 和 13.3 d,标准差分别为 4.3,8.1,10.6,13.6 和 15.0 d。超高肥与高肥处理之间差异不大,但与中肥、低肥、无肥处理差异明显。

其中超高肥处理的冬小麦最早受到干旱胁迫(1966 年);高肥、中肥和低肥处理次之,分别在 1968,1974 和 1977 年出现干旱胁迫;无肥处理只有在模拟后期(1994 年)才受到干旱胁迫(图 4)。说明随着农田土壤肥力和粮食产量的持续提高,旱作农田土壤水分利用率不断提高,土壤水分支出不断增加,使土壤水库中的有效水分含量持续下降,导致小麦容易受到干旱胁迫。

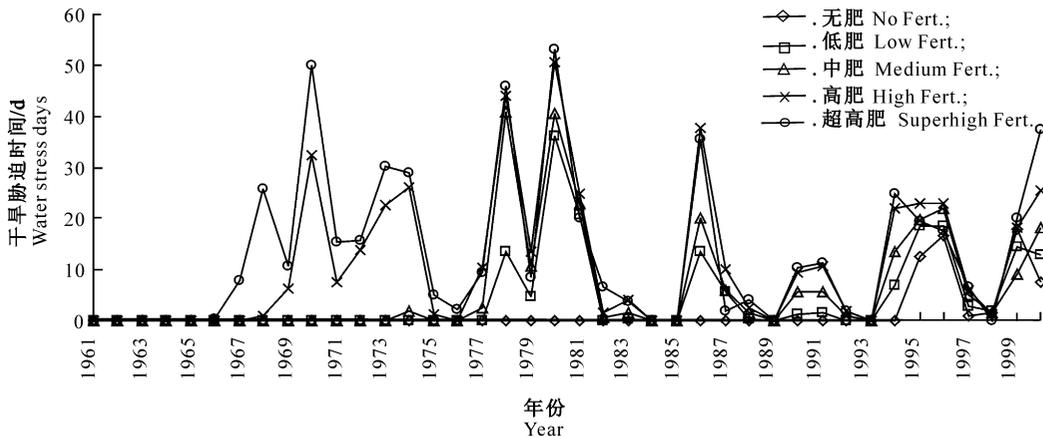


图 4 1961~2000 年不同施肥水平下宝鸡旱塬连作冬小麦干旱胁迫时间模拟值的变化

Fig. 4 Changes of simulated soil water stress days of winter wheat continuous cropping under different fertilization levels in Baoji dry-land during 1961—2000

1961~2000 年的 40 年间,无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理生育期氮素胁迫模拟时间分别介于 0~97,0~84,0~84,0~8 和 0~75 d,年均氮素胁迫时间分别为 57.3,49.7,46.3,42.6 和 35.5 d,存在明显差异,表明随施肥量增加,氮素胁迫程度逐渐

降低。各施肥处理的氮素胁迫时间均呈波动上升的趋势(图 5),无肥处理的冬小麦最早出现氮素胁迫(1968 年),低肥处理次之(1970 年),超高肥处理直到 1972 年才出现氮素胁迫。该结果表明,低肥和无肥处理冬小麦比中肥、高肥、超高肥处理更容易遭受

氮素胁迫的影响,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。

3.4 不同施肥水平下宝鸡旱塬连作冬小麦土壤模拟有效含水量的变化

宝鸡旱塬冬小麦根系分布和水分吸收利用的主要土层为 0~3 m^[5],但是在黄土高原旱作高产粮田,在旱季作物生长高峰期及干旱年份,作物根系吸水作用能达到 5 m,所以为了进一步的探讨土壤有效水分的变化,本试验对 0~7 m 土层土壤有效水分的变化情况进行了研究。图 6 显示,在 1961~2000 年的 40 年间,无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理 0~7 m 土层逐月土壤有效含水量模拟值分别为 574~1 127,560~1 106,441~1 106,434~1 106 和 308~1 106 mm,平均值分别为 770.0,730.5,

658.9,620.1 和 557.7 mm,标准差分别为 161.6,154.2,174.5,153.9 和 168.3 mm,变异系数分别为 20.9%,21.1%,26.4%,24.8% 和 30.2%。无肥与低肥处理间及中肥与高肥处理间差异不显著,无肥和高肥处理间及高肥和超高肥处理间差异显著,表明土壤肥力越高,土壤有效含水量越低,年度和季节变幅越大。随着连作年限的增加,无肥和低肥处理麦田逐月土壤有效含水量变化曲线基本重合,且在较高水平上波动;中肥、高肥和超高肥处理麦田逐月土壤有效含水量明显低于无肥和低肥处理,在较低水平上波动。在干旱年份和冬小麦生长旺盛期,麦田土壤有效含水量显著降低,而在多雨年份和夏闲蓄墒期得到一定的恢复和提高。

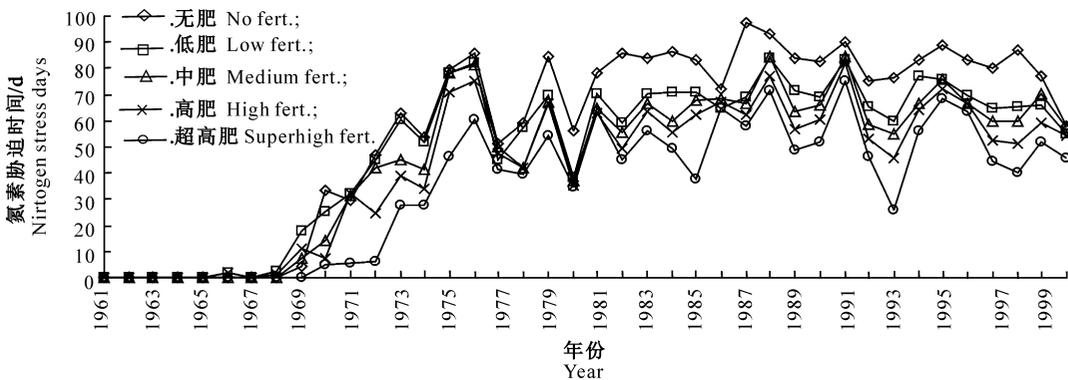


图 5 1961~2000 年不同施肥水平下宝鸡旱塬连作冬小麦氮素胁迫时间模拟值的变化

Fig. 5 Changes for simulated nitrogen stress days of continuous winter wheat field under different fertilization levels in Baoji dry-land during 1961—2000

图 6 还表明,随着年度和季节降水量的变化,各施肥处理逐月土壤有效含水量均呈逐渐下降趋势,超高肥和高肥处理的下降速度大于低肥和无肥处理。无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理在模拟 1960-09 冬小麦播种期的土壤有效含水量均为 1 064 mm,经过 40 年的冬小麦生长利用消耗后,分别降低到 2000-06 冬小麦收获期的 609,602,469,469 和 336 mm,经历 40 年后土壤含水量分别降低 455,462,595,595 和 728 mm,年均土壤干燥化速率分别为 11.4,11.6,14.9,14.9 和 18.2 mm/a。与无肥处理相比,低肥、中肥、高肥和超高肥处理麦田经过 40 个生产年度后多消耗土壤水分 8,140,140 和 272 mm。

在 40 年连作期间,宝鸡旱地无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理冬小麦田水分利用效率的平均值分别为 0.13,0.18,0.21,0.25 和 0.25 kg/m³,表明随着施肥量增加,旱地冬小麦田水分利用效率逐渐提高。各施肥处理冬小麦田 0~7 m 土层土壤含水

量均低于无肥处理,而小麦产量和水分利用效率明显提高,从增产和土壤水分可持续利用角度统筹考虑,以中肥和高肥处理为最佳。从模拟结果来推断,宝鸡旱塬冬小麦田土壤水分承载力介于中肥和高肥处理之间,即 40 年产量平均值为 3.327~3.981 t/hm²,相应的肥力水平为 N 120~150 kg/hm² 和 P 60~75 kg/hm²。

图 6 表明,0~7 m 土层土壤有效含水量随小麦生长利用消耗和雨季降水补充而呈现剧烈的年际间波动和季节性波动,在少雨年份和小麦生长旺盛期呈现逐渐下降趋势,而在多雨年份和夏闲期雨季得到降水补充和恢复提高,通常以每年 5~7 月份土壤含水量最低,8 月~翌年 4 月含水量较高。在一些干旱年份的 6 月份,超高肥处理 0~7 m 土层土壤有效含水量最低接近于 300 mm,发生了严重的季节性土壤干燥化。长时段模拟结果表明,由于年度降水量的趋势性减少和中肥、高肥和超高肥力处理作物耗水量的增加,在肥、低肥、中肥、高肥和超高肥 5

个处理下,宝鸡旱塬连作冬小麦田逐月土壤有效含水量均呈波动性缓慢降低趋势。

为了进一步清晰展示模拟初期已经发生急剧干燥化的麦田土壤有效含水量的后续变化趋势,将1961~2000年不同施肥处理冬小麦田逐个生产年度的平均土壤有效含水量(上年7月~翌年6月的

平均值)的变化趋势展示于图7。结果显示,随着冬小麦生产年度内降水量的趋势性减少,旱塬麦田无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥力处理逐年土壤有效含水量均呈波动性降低趋势,旱地麦田干燥化趋势仍然非常明显。

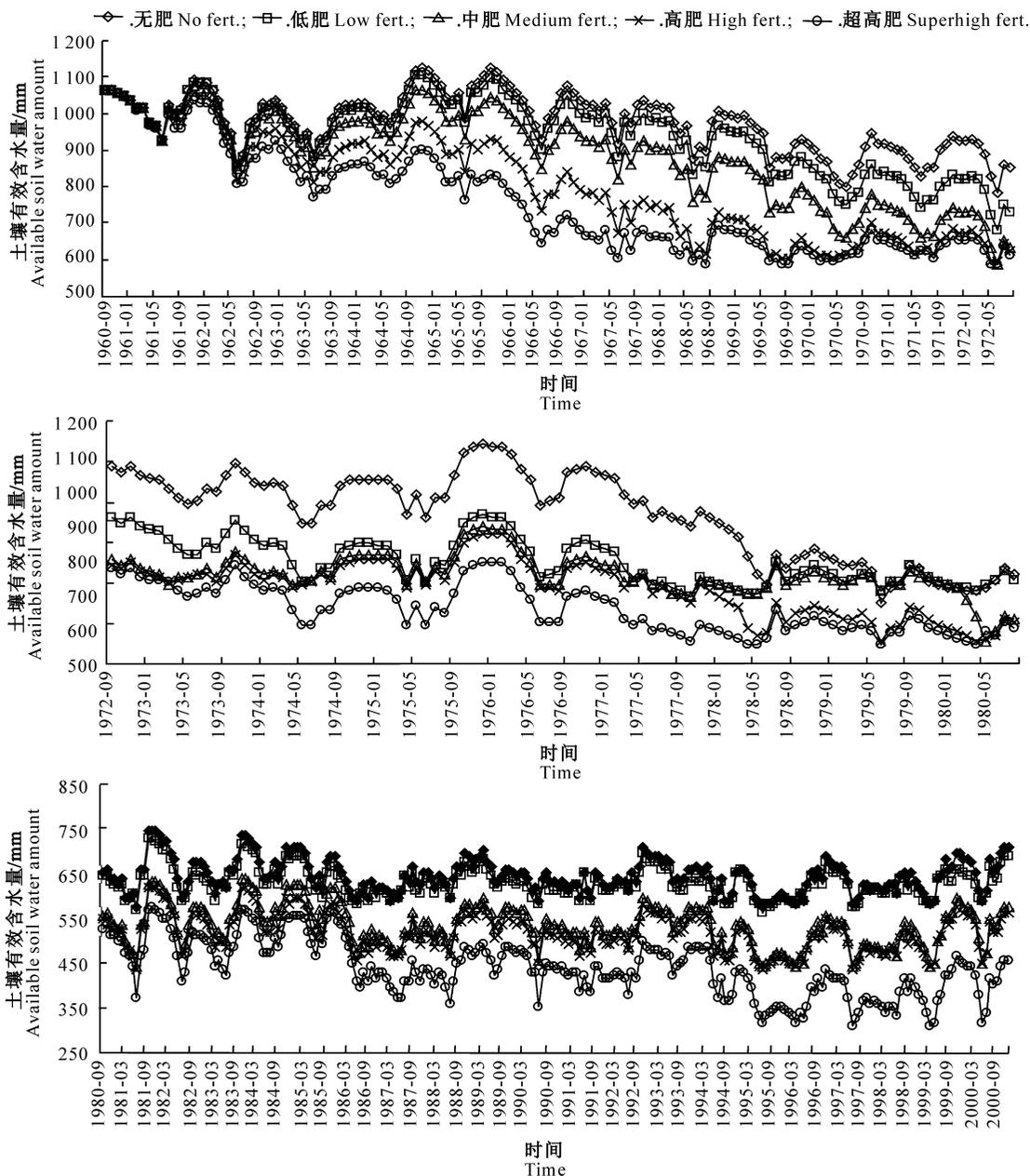


图6 不同施肥水平下宝鸡旱塬冬小麦田0~7 m土层逐月土壤有效含水量模拟值的变化

Fig. 6 Simulated monthly available soil water amount changes in 0~7 m soil layers of continuous winter wheat field under different fertilization levels at Baoji dry-land

3.5 不同施肥水平宝鸡旱塬冬小麦田土壤模拟湿度的剖面分布变化

黄土区土层深厚疏松,犹如一个巨大的蓄水库,具有保蓄水分和供给植物水分的功能,对降水不足

和分布不均所造成气候上的旱情能起到有效的缓和作用。塬区冬小麦耗水量的35.4%是由土壤水提供的^[14],但旱作农田高生产力的水分环境效应导致土壤蓄水量降低从而削弱了土壤水库的调节作用,出

现高生产力高波动现象^[15]。

1961~2000年的40年,各肥力处理的初期(1961~1968年)、中期(1977~1984年)、后期(1990~1997年)逐年0~7 m土层土壤湿度的剖面分布变化见图8。由图8可知,与模拟开始的1961年相比,无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理均在模拟初期(1962~1968年)出现了麦田土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的过程;各处理冬小麦田0~7 m土层土壤水分利用的最大深度分别在连作的第5~6年、第4~5年、第6~7年、第7~8年和第7~8年达到3,3,4,4和5 m;分别在连作的第5,5,8,7和9

年后,小麦田2~3,2~3,2~4,2~4和2~5 m土层的土壤湿度长期保持在0.083~0.087 m/m的稳定干燥化状态,已不随降水发生年度变化(只有0~2 m土层土壤湿度随降水量的变化发生年际变化)。在特大丰水年型,降水入渗补充深度才可能超过2 m。无肥和低肥处理土壤干层分布于2~3 m土层,中肥和高肥处理均分布于2~4 m土层,超高肥处理分布在2~5 m土层。表明在黄土高原南部半湿润旱塬地区,随着肥力水平和冬小麦产量水平的提高,土壤干燥化程度加剧,土壤干层厚度增厚。

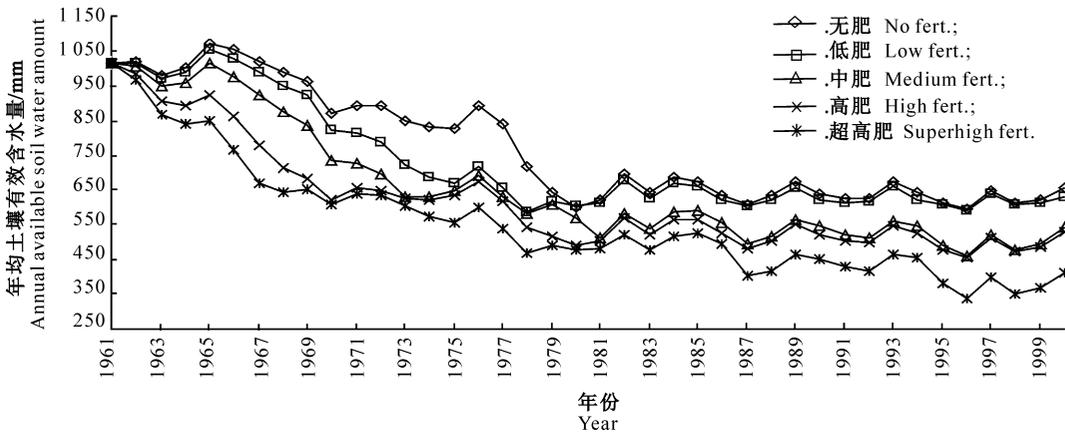
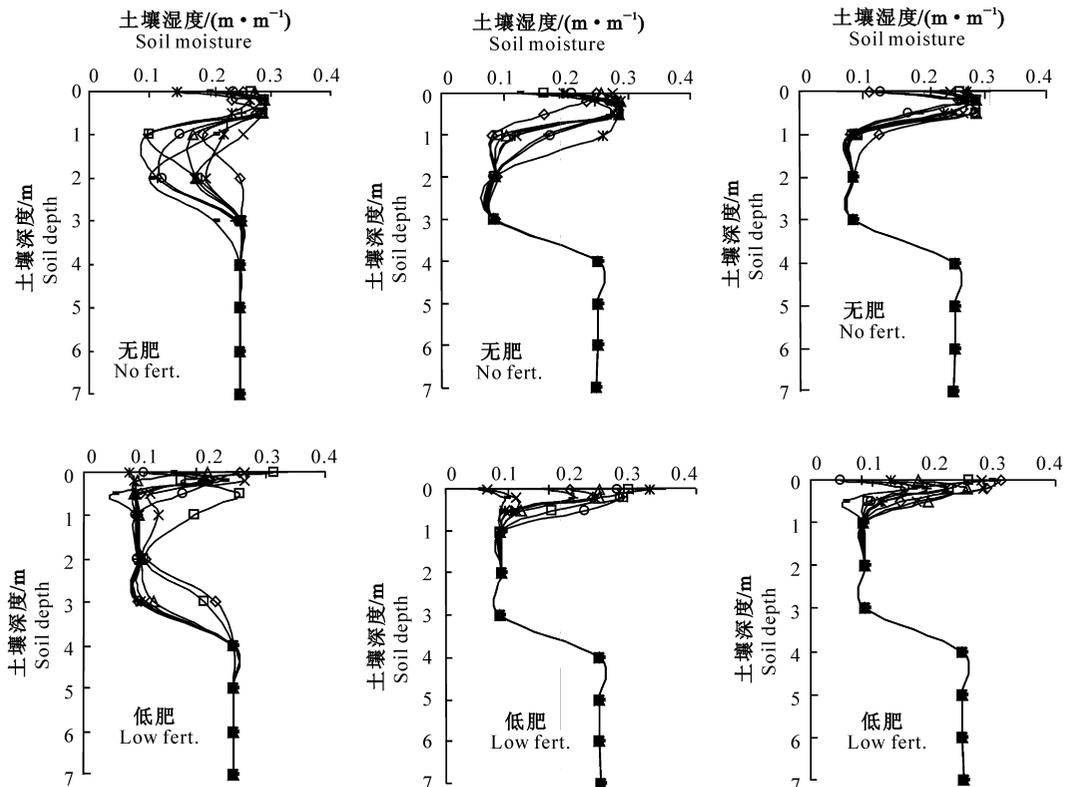


图7 不同施肥水平下宝鸡旱塬连作冬小麦田0~7 m土层逐年土壤有效含水量模拟值的变化动态
Fig. 7 Simulated yearly available soil water amount changes in 0-7 m soil layers of continuous winter wheat field under different fertilization levels in Baoji dry-land



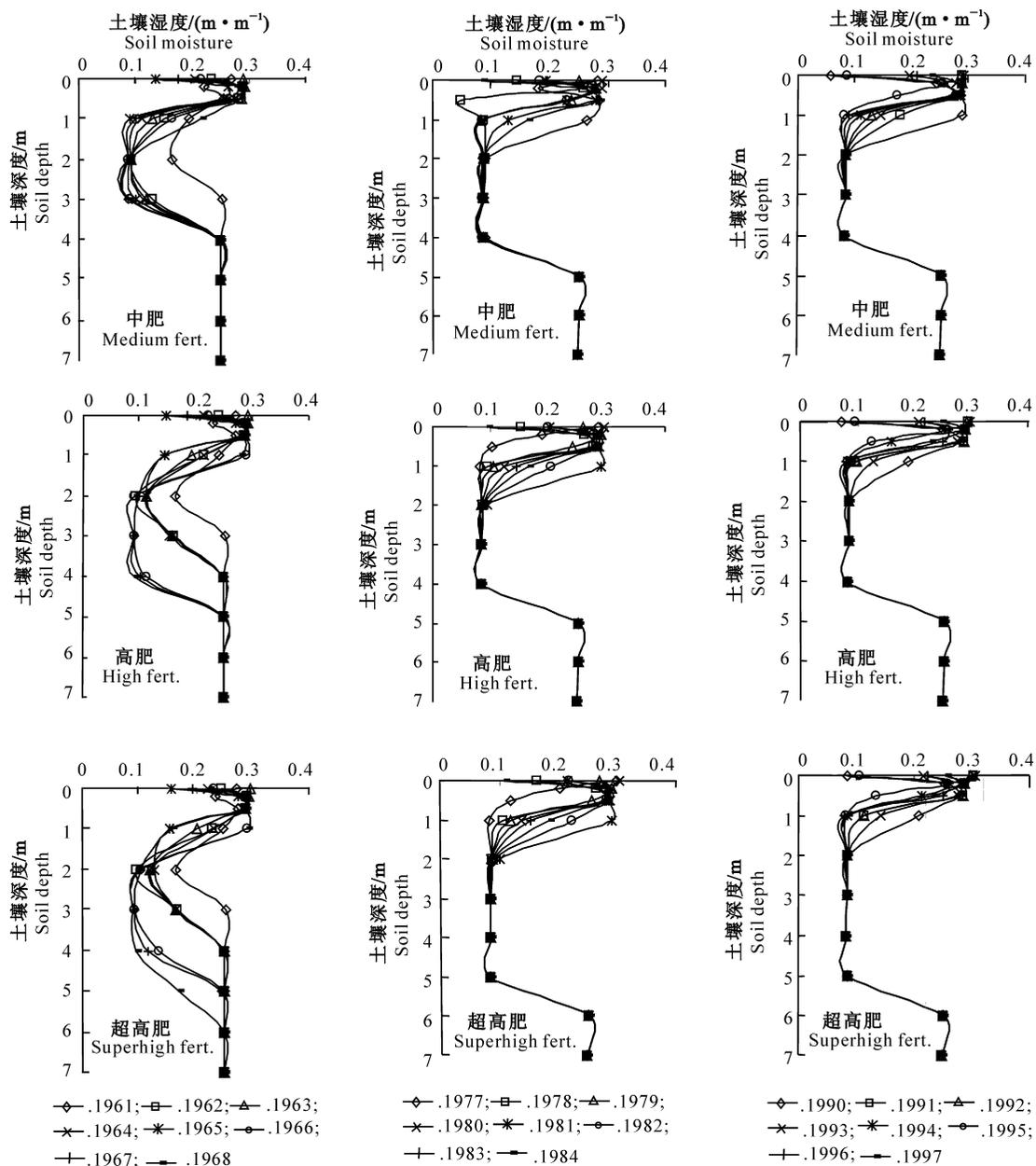


图 8 模拟初期、中期和后期不同施肥水平下宝鸡旱塬连作冬小麦田土壤剖面湿度的变化

Fig. 8 Changes of soil moisture distribution changes in 0–7 m soil profile at beginning, middle and end periods of continuous winter wheat under different fertilization levels in Baoji dry-land

4 讨论与结论

1) 本试验利用 WinEPIC 模型, 模拟研究了黄土高原半湿润区宝鸡旱塬不同施肥水平下连作冬小麦的产量效应。结果显示, 在低肥力水平下, 模拟值与观测值之间的平均误差为 16.9%, 表明用 WinEPIC 模型模拟连作冬小麦籽粒产量可以取得较好的模拟效果, 该模型适用于黄土高原半湿润区小麦连作系统的模拟研究。但模型也有稍显不足之处, 例如模型对土壤剖面的分层数目仅限于 10 层, 故对

0~7 m 的土壤剖面深层土壤的湿度状况的描述尚不够细致。

2) 无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥处理冬小麦连作逐月土壤有效含水量均呈现波动性降低趋势, 年均土壤干燥化速率分别为 11.4, 11.6, 14.9, 14.9 和 18.2 mm/a。无肥与低肥处理及中肥与高肥处理间差异不显著; 无肥和高肥处理及高肥和超高肥处理间差异显著, 表现为肥力越高, 作物耗水量越大, 土壤有效含水量越低。

3) 5 种施肥水平下连作冬小麦田 0~7 m 土层

土壤剖面表现出湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的强烈干燥化过程,且均出现了土壤湿度保持相对稳定的土壤干层。无肥和低肥处理土壤干层分布于2~3 m土层,中肥和高肥处理均分布于2~4 m土层,超高肥处理分布于2~5 m。表明随着肥力和作物产量水平的提高,土壤干层厚度加深。

4) 在1961~2000年模拟研究期间,无肥、低肥、中肥、高肥和超高肥5种施肥水平下,冬小麦连作方式的产量均呈现出显著的波动性下降趋势,其平均值分别为1.588,2.306,3.327,3.981和4.764 t/hm²,以中肥、高肥和超高肥处理的增产效果最好。从增产和土壤水分可持续利用角度统筹考虑,以中肥和高肥处理最佳。因此,宝鸡旱塬冬小麦连作中适宜的施肥量范围为N 120~150 kg/hm²和P 60~75 kg/hm²。

[参考文献]

- [1] 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(6):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]. Journal of Natural Resources,2004,19(6):738-745. (in Chinese)
- [2] 郝明德,来 璐,王改玲.黄土高原旱地长期施肥对小麦产量的影响[J].应用生态学报,2003,14(11):1893-1896.
Hao M D,Lai L,Wang G L. Effect of yield wheat with long-term fertilization in table dry-land of the Loess Plateau [J]. Chinese journal of applied Economy,2003,14(11):1893-1896. (in Chinese)
- [3] 张少民,郝明德,陈 磊.黄土高原长期施肥对小麦产量及土壤肥力的影响[J].干旱地区农业研究,2006,11(6):85-89.
Zhang S M,Hao M D,Chen L. Effects of long-term fertilization on yield of wheat and soil fertility in dry-land of Loess Plateau [J]. Agriculture Research In Arid Areas,2006,11(6):85-89. (in Chinese)
- [4] 王 力,邵明安,王全九,等.黄土区土壤干化研究进展[J].农业工程学报,2004,9(4):27-30.
Wang L,Shao M A,Wang Q J,et al. Review of research on soil desiccation in the Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE,2004,9(4):27-30. (in Chinese)
- [5] 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 dry-land [J]. Acta pedologica Sinica,2001,38(3):353-356. (in Chinese)
- [6] Williams J R. The EPIC model [M]. USA:Blackland Research

Center,the Texas A & M University,1995.

- [7] Williams J R,Dyke P T,Fuchs W W,et al. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator:2. User Manual [M]. USA: Agriculture Technical Bulletin No. 1768,1990.
- [8] 李 军,邵明安,张兴昌. EPIC模型中农田水分运转与利用的数学模拟[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):73-75.
Li J,Shao M A,Zhang X C. Simulation equations for soil water transfer and crop use in the EPIC model [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2004,22(2):73-75. (in Chinese)
- [9] 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 Nutrition and Fertilizer Science,2005,11(2):166-173. (in Chinese)
- [10] 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 model [J]. Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition,2004,32(8):21-26. (in Chinese)
- [11] 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:Chinese Agriculture Press,1995:244-254. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 高云晖.粮油轮作中施肥对产量和土壤肥力的影响[J].土壤肥料,2004(1):22-24.
Gao Y H. Influence of fertilization on yield and soil fertility in grain and oil rape rotation [J]. Fertilization of Soil,2004(1):22-24. (in Chinese)
- [14] 李玉山,喻安屏.土壤深层储水对小麦的增产效应研究[J].土壤学报,1980,17(1):43-54.
Li Y S,Yu B P. Research effect of deep soil layer water with winter wheat increase production [J]. Journal of Soil,1980,17(1):43-54. (in Chinese)
- [15] 董翠云,黄明斌,李玉山.黄土塬区旱作农田高生产力的水分环境效应与产量波动性[J].土壤与环境,2000,9(3):204-206.
Dong C Y,Huang M B,Li Y S. Effect of water environment and fluctuation with Higher Productivity in table dry-land of Loess Plateau [J]. Soil and Environmental Sciences,2000,9(3):204-206. (in Chinese)