

黄土高原不同降水类型区旱作玉米田土壤干燥化效应与土壤水分承载力模拟研究

王学春¹, 李 军^{1,2,*}, 蒋 斌³, 胡 伟¹

(1. 西北农林科技大学农学院, 2. 中国科学院、水利部水土保持研究所,

3. 西北农林科技大学资环学院, 陕西 杨凌 712100)

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不同降水类型区 1960~2000 年期间不同肥力水平下连作春玉米的产量变化和土壤水分效应。模拟结果表明:(1)洛川、延安、寿阳、榆林连作春玉米产量地区间差异显著,其年平均值为 4.40、3.75、2.50、1.75 t/hm²。施肥增产率和水分利用效率地区间差异均显著,均表现为洛川>延安>寿阳>榆林;同一地区水分利用效率随施肥量的增加而提高,不同地区施肥增产率最大值范围不同。(2)0~7m 土层逐月土壤有效含水量地区间差异显著,洛川>延安>寿阳>榆林;同一地区内肥力水平越高,春玉米耗水量越大,逐月土壤有效含水量平均值越低。在春玉米生育期内 0~7m 土层年度土壤有效水分增减量地区间差异显著,洛川<延安<寿阳<榆林;不同肥力处理间的差异在模拟前期为显著,在模拟后期为不显著。(3)所有地区的春玉米在连作期间 0~7m 土层土壤湿度剖面分布,在经历了土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的干燥化过程后,均出现了稳定的土壤干层。土壤干燥化速度地区间差异显著,洛川<延安<寿阳<榆林;不同肥力处理间随着施肥水平的提高土壤干燥化速度加快。(4)洛川、延安、寿阳、榆林连作春玉米的适宜产量水平分别为 5.25~5.54、4.26~4.58、2.34~2.74、1.37~1.62 t/hm²,相应的施肥水平分别为 N₂₄₀(N 240 kg/hm², P 120 kg/hm²)~N₃₀₀(N 300 kg/hm², P 150 kg/hm²)、N₁₈₀(N 180 kg/hm², P 90 kg/hm²)~N₂₄₀(N 240 kg/hm², P 120 kg/hm²)、N₁₂₀(N 120 kg/hm², P 60 kg/hm²)~N₁₈₀(N 180 kg/hm², P 90 kg/hm²)、N₆₀(N 60 kg/hm², P 30 kg/hm²)~N₁₂₀(N 120 kg/hm², P 60 kg/hm²)。

关键词:黄土高原;连作春玉米;Win EPIC 模型;产量;土壤水分;施肥

文章编号:1000-0933(2009)04-2053-14 中图分类号:S152.7 文献标识码:A

Simulation of yield and soil desiccation effects of continuous spring maize in different precipitation areas of the Loess Plateau

WANG Xue-Chun¹, LI Jun^{1,2,*}, JIANG Bin³, HU Wei¹

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 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2053~2066.

Abstract: Based on model validation, the Win EPIC model was used to simulate yield and soil desiccation effects of continuous spring maize under different fertilization treatments on different precipitation areas of the Loess Plateau during 1960–2000. The simulated results showed as following: (1) The difference of spring maize yield in Luochuan, Yan'an, Shouyang, and Yulin was significant, and its average was 4.40 t/hm², 3.75 t/hm², 2.50 t/hm² and 1.75 t/hm², respectively. The difference of water used efficiency (WUE) and increased rate of yield by fertilizer (RYF) in Luochuan, Yan'an, Shouyang and Yulin were both notable and reduced by the order. The WUE enhanced with the increase of fertilizer, and the maximum value of RYF was in different fertilizer range in difference areas. (2) Monthly available soil water in 0–7m soil profile was significantly different and the value of Luochuan, Yan'an, Shouyang, and Yulin was

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

收稿日期:2007-10-29; 修订日期:2008-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

reduced in sequence. In the same area, the higher fertilizer applied, the more water consumption, the less monthly available soil water remained. The difference of annual reduced soil water among different areas was significant, and increased with sequences of Luochuan, Yan'an, Shouyang and Yulin. Difference of annual reduced available soil water in 0—7m soil profile among different fertilizer treatments was notable at the earlier simulation stage, but was not significant at the later stage. (3) A relative stable desiccated soil layers shaped in 0—7m soil profile after soil water depleted and desiccated soil layers thickened period. Soil desiccated rate in Luochuan, Yan'an, Shouyang, and Yulin increased in the sequence. The higher fertilizer applied, the faster soil desiccate rate reached. (4) The suitable yield of continuous spring maize in Luochuan, Yan'an, Shouyang, and Yulin was 5.25—5.54 t/hm²、4.26—4.58 t/hm²、2.34—2.74 t/hm²、1.37—1.62 t/hm², respectively, and reasonable fertilizer amount in corresponding area was N₂₄₀ (N 240 kg/hm², P 120 kg/hm²)—N₃₀₀ (N 300 kg/hm², P 150kg/hm²)、N₁₈₀ (N 180 kg/hm², P 90kg/hm²)—N₂₄₀ (N 240 kg/hm², P 120 kg/hm²)、N₁₂₀ (N 120 kg/hm², P 60kg/hm²)—N₁₈₀ (N 180 kg/hm², P 90kg/hm²)、N₆₀ (N 60 kg/hm², P 30kg/hm²)—N₁₂₀ (N 120 kg/hm², P 60kg/hm²), separately.

Key Words: the Loess Plateau; continuous spring maize; Win EPIC model; grain yield; soil water; fertilization

土壤干燥化是黄土高原半干旱和半湿润环境条件下形成的一种特殊的水文现象^[1], 是环境旱化和植物过量耗水的结果。李玉山对黄土高原高产粮田的土壤干燥化成因和危害进行了细致的研究, 认为高产田作物对土壤水分过量消耗是导致土壤相对干燥化和产量出现波动性的直接原因^[2]。在黄土高原地区, 玉米耗水量和耗水深度随产量和施肥量提高而增加, 导致了旱作高产玉米田深层土壤水分过耗和土壤干燥化现象发生, 2m 以下深层土壤水库贮水量亏缺, 玉米生产对当季降水供给依赖增大, 产量年际波动性加剧^[2,3]。李军等初步模拟研究渭北旱塬地春玉米连作条件下的水分生产潜力和根层土壤水分动态^[4]。周怀平等利用长期定位试验研究了施肥对连作春玉米产量的增产效果, 但缺少对连作期间土壤水分利用和土壤干燥化进程的监测^[5]。本研究在李军和周怀平等的研究基础上, 致力于对不同降水类型区和肥力水平下连作春玉米产量波动性和土壤干燥化过程的定量研究, 分析不同地区和肥力水平下春玉米连作中产量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, 为黄土高原玉米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

美国建立的环境政策综合气候模型 EPIC (environmental policy integrated climate), 原名侵蚀和生产力影响计算模型 (erosion-productivity impact calculator), 由气象模拟、水文学、侵蚀、营养循环、农药残留、作物生长、土壤温度和土壤耕作等模块组成, 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, 是一个能够定量评价“气候-土壤-作物-管理”综合系统的动力学模型, 可用来评价农田作物生产管理策略和水土资源环境效应^[6,7]。本研究采用能够在 Windows 环境下运行的 WinEPIC 3060 版, 可以输出逐日分层土壤水分模拟结果, 适用于作物生产系统综合性模拟分析和应用研究, 特别适合于旱地土壤水分生态环境效应的模拟和分析^[8]。在世界范围内 EPIC 模型已广泛应用于大田作物生产力的模拟研究^[9~13], 李军等应用 EPIC 对黄土高原大田作物和林草地的水分生产力的模拟研究表明 EPIC 模型在黄土高原有较好的适用性^[14~16]。

1.2 Win EPIC 模型数据库

运行 Win EPIC 模型前需要分别建立气象数据库、土壤参数数据库和作物参数数据库等数据库。将洛川 (1955~2001 年)、延安 (1955~2000 年)、太原 (1955~2000 年)、榆林 (1954~2001 年) 逐日太阳辐射量、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速等实时数据, 根据模型的格式要求导入气象数据库中^[17], 建成洛川、延安、寿阳、榆林逐日实时气象数据库, 其中寿阳的实时气象数据用太原站代替, 其它地区的气象数据均为当

地气象台站的实时气象数据。通过实地观测和查阅相关资料^[18~20],分别确定了 EPIC 模型中洛川、延安、寿阳、榆林典型农作土壤——粘黑垆土、黄绵土、褐土性土、绵沙土的土壤剖面理化性状参数。本研究将所有地区的土壤分成了 10 个土层,土层总厚度为 7.0m,依次输入逐层土壤理化性状参数,建立土壤参数数据库;通过查阅相关文章^[21]和实测数据,分别对试区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修订建立作物参数数据库。

1.3 模拟研究方法

依据黄土高原降水地域分异特征和粮食作物生产布局状况,选取半湿润区的洛川、半湿润偏旱区的延安、半干旱区的寿阳、半干旱偏旱区的榆林作为代表点,在每个代表点均设定 6 种肥力水平: N_0 ($N\ 0\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P\ 0\ \text{kg}/\text{hm}^2$)、 N_{60} ($N\ 60\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P\ 30\ \text{kg}/\text{hm}^2$)、 N_{120} ($N\ 120\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P\ 60\ \text{kg}/\text{hm}^2$)、 N_{180} ($N\ 180\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P\ 90\ \text{kg}/\text{hm}^2$)、 N_{240} ($N\ 240\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P\ 120\ \text{kg}/\text{hm}^2$)、 N_{300} ($N\ 300\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P\ 150\ \text{kg}/\text{hm}^2$),各个地区玉米种植密度均为 $50000\ \text{株}/\text{hm}^2$,其它管理措施同大田。在 1960~2000 年期间,定量模拟和分析比较不同地区和肥力水平旱地春玉米连作条件下产量变化和土壤干燥化效应。在分析春玉米田逐月土壤有效含水量变化动态时,以每月 15 日土壤有效含水量代表该月土壤有效含水量;在分析玉米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 15 日土壤湿度剖面分布特征代表该年土壤湿度剖面分布特征。为了便于分析,在进行地区间对比时,作物产量和田间逐月土壤有效含水量均采用所有施肥处理的平均值作为代表。在进行施肥处理间对比时,相应的指标均采用地区间的平均值作为代表。

2 WinEPIC 模型模拟精度验证

在建立了基本数据库后,本文选取寿阳地区为代表点对模型的模拟精度进行验证。在对春玉米产量和耗水量验证的基础上^[22],此次验证主要进行了土壤剖面湿度和春玉米水分利用效率的验证。肥力处理分别为:(1)无肥处理,不施任何肥料(NP_0);(2)氮磷处理 1,施纯氮 $60\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 纯磷 $37.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ (NP_1);(3)氮磷处理 2,施纯氮 $120\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、纯磷 $75\ \text{kg}/\text{hm}^2$ (NP_2);(4)氮磷处理 3,施纯氮 $150\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、纯磷 $95\ \text{kg}/\text{hm}^2$ (NP_3)肥料施用时间与当地大田管理相同。利用 N_0 、 N_{60} 、 N_{120} 的观测值^[5]对模型模拟的春玉米水分利用效率($1\ \text{hm}^2$ 土地上消耗 $1\ \text{mm}$ 水分所能生产的春玉米产量($\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$),即水分利用效率 = $1\ \text{hm}^2$ 春玉米产量/生育期春玉米耗水量)进行验证,利用 NP_3 的土壤剖面水分观测值^[23]对模型模拟的土壤剖面湿度精度进行验证。

春玉米产量和耗水量的验证结果^[22]表明,模型可以较为精确的模拟不同施肥处理下连作春玉米的产量和总体土壤水分变化动态。将 NP_0 、 NP_1 、 NP_2 3 个处理的春玉米水分利用效率的模拟值和观测值进行比较以评价模型对水分利用效率的模拟精确性(表 3、图 1),其中观测值为寿阳试验站 1992~2001 年长期定位试验中的春玉米水分利用效率^[5]。表 1 显示,在 1992~2001 年试验研究期间, NP_0 、 NP_1 、 NP_2 春玉米水分利用效率模拟值和观测值的相关系数分别为 0.837、0.747 和 0.761,达到极显著水平,模拟平方根误差 RMSE 分别为 1.15、1.97、2.31 $\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$ 。

将 NP_3 处理的春玉米田 0~5m 土壤剖面湿度模拟值和观测值进行比较以评价模型对土壤剖面湿度的模拟精度(表 2、图 2),其中观测值为寿阳试验站 1992~2003 年长期定位试验中 2003 年春玉米田 0~5m 土壤剖面湿度^[23]。 NP_3 春玉米田 0~5m 土壤剖面湿度模拟值和观测值的平均值分别为 0.135m/m 和 0.160m/m,相关系数为 0.728,达到了显著水平,平均相对误差为 0.92%,模拟平方根误差 RMSE 为 0.03m/m。

图 1、图 2 分别为 NP_0 、 NP_1 、 NP_2 春玉米水分利用效率和 NP_3 0~5m 土壤剖面湿度的模拟值与观测值逐年和逐层变化曲线的比较,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肥力水平下连作春玉米的水分利用效率和土壤剖面湿度的变化动态。综上所述,经过修订的 EPIC 模型可用于黄土高原连作春玉米的产量效应和土壤水分效应模拟研究。

3 模拟结果与分析

3.1 不同地区和肥力水平下连作春玉米产量变化

在 1960~2000 年模拟研究期间,半湿润区洛川、半湿润偏旱区延安、半干旱区寿阳、半干旱偏旱区榆林 6

表 1 寿阳试区不同肥力水平连作春玉米水分利用效率模拟值与观测值比较

Table 1 Comparison of simulated and observed water used efficiency of continuous spring maize under different fertilization treatments at Shouyang

项目 Item	NP ₀ 无肥处理 NP ₀ treatment			NP ₁ 处理 NP ₁ treatment			NP ₂ 处理 NP ₂ treatment		
	模拟值 [kg/(mm·hm ²)] Simulated	观测值 [kg/(mm·hm ²)] Observed	相对 误差 (%) Error	模拟值 [kg/(mm·hm ²)] Simulated	观测值 [kg/(mm·hm ²)] Observed	相对 误差 (%) Error	模拟值 [kg/(mm·hm ²)] Simulated	观测值 [kg/(mm·hm ²)] Observed	相对 误差 (%) Error
平均值 Average	7.52	7.24	3.91	12.37	11.78	5.01	12.09	12.57	3.86
RMSE		1.15			1.97			2.31	
回归方程 Regression equation	$y = 2.877 + 0.580x$			$y = 2.388 + 0.759x$			$y = 5.266 + 0.608x$		
相关系数 Correlation index	0.837 **			0.747 **			0.761 **		

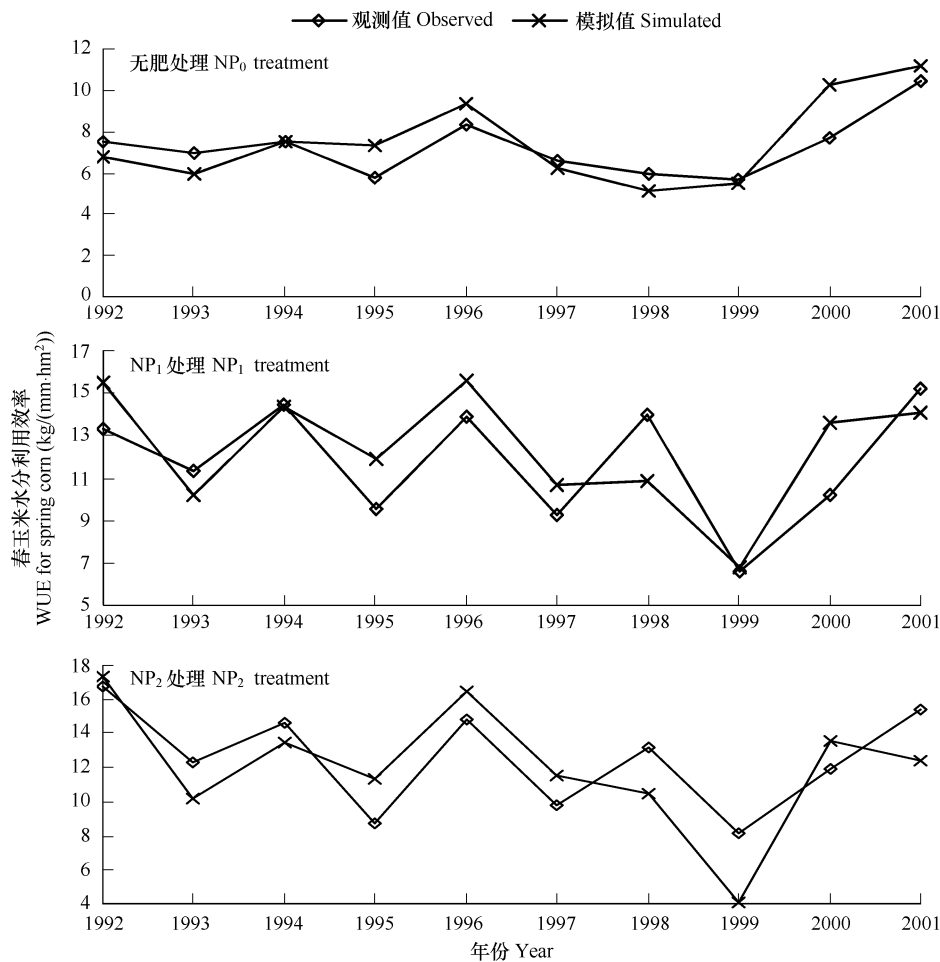


图 1 寿阳地区不同肥力水平下连作春玉米水分利用效率模拟值与观测值的比较

Fig. 1 Comparison between simulated and observed water used efficiency of continuous spring maize under different fertilizer treatments

种肥力处理春玉米产量平均值差异显著,分别为 4.40、3.75、2.50、1.75 t/hm²(表 3)。降水量和春玉米产量的相关系数分别达到 0.81、0.87、0.56、0.85,达到极显著相关水平,4 个地区春玉米产量的逐年变化趋势和降水量的逐年变化趋势一致(图 3),降水量的地区间差异是造成地区间春玉米产量差异的主要原因。4 个地区

玉米产量平均值 N_0 、 N_{60} 、 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 、 N_{300} 分别为 1.87、2.39、2.80、3.16、3.46、3.64 t/hm^2 , 随肥力水平提高春玉米产量逐渐增加。

表 2 寿阳试区 NP_3 连作春玉米田土壤剖面湿度模拟值与观测值比较

Table 2 Comparison of simulated and observed soil moisture for different sections of continuous spring maize under NP_3 treatment at Shouyang

项 目 Item	模拟值 Simulated(m/m)	观测值 Observed(m/m)	相对误差 Error(%)
	0.135 *	0.160 *	0.92 *
RMSE		0.03	
回归方程 Regression equation		$y = 0.009 + 0.758x$	
相关系数 Correlation index		0.728	
平均值 Average			

表 3 不同地区年降水量(mm)和不同肥力水平下连作春玉米产量平均值(t/hm^2)

Table 3 Annual precipitation and average spring maize yield under different fertilization treatments in different areas

处理 Treatments	洛川 Luochuan	延安 Yan'an	寿阳 Shouyang	榆林 Yulin	平均 average
N_0	3.09	2.45	1.48	0.99	1.87
N_{60}	3.57	2.91	2.03	1.37	2.39
N_{120}	4.13	3.58	2.34	1.62	2.80
N_{180}	4.83	4.26	2.74	1.73	3.16
N_{240}	5.25	4.58	3.14	1.83	3.46
N_{300}	5.54	4.75	3.29	1.87	3.64
平均 Average	4.40	3.75	2.50	1.57	2.89
降水量 Precipitation(mm)	605.7	534.2	445.5	387.8	

不同肥力处理连作春玉米产量在洛川、延安、寿阳、榆林四个地区均呈现波动性下降趋势(图 3、表 4), 模拟研究后期(1990~2000 年)较模拟研究前期(1960~1969 年)春玉米产量平均值分别降低 35%、59%、65%、70%, 产量降低程度洛川<延安<寿阳<榆林。在 41a 连作春玉米产量变化曲线中, 高峰多出现在模拟研究前期和年平均降水量较多的年份, 低谷则出现在模拟研究后期和年平均降水量较少的年份。单从产量看, 在半湿润区的洛川连作春玉米的适宜施肥水平为 $N_{180} \sim N_{300}$ 、在半湿润偏旱区的延安为 $N_{120} \sim N_{240}$, 在半干旱区的寿阳为 $N_{120} \sim N_{240}$, 在半干旱偏旱区的榆林为 $N_{60} \sim N_{180}$, 相应的产量水平分别为 4.83~5.54 t/hm^2 、3.58~4.58 t/hm^2 、2.34~3.14 t/hm^2 、1.37~1.73 t/hm^2 。

3.2 不同地区和肥力水平下春玉米肥料增产率和水分利用效率

施肥增产率(在 $1hm^2$ 土地上每增加 1kg 肥料所增加的春玉米产量(t/hm^2))地区间差异显著, 洛川、延安、寿阳、榆林平均值分别为 0.0081、0.0077、0.0060、0.0029 t/hm^2 , 洛川>延安>寿阳>榆林。不同地区施肥增产率的最大值范围不同。图 4 显示在半湿润区的洛川和半湿润偏旱区的延安春玉米施肥增产率在 $N_{120} \sim N_{180}$ 范围内达到最大值然后呈下降趋势。在半干旱地区的寿阳在 $N_0 \sim N_{60}$ 范围内达到最大值, $N_{60} \sim N_{120}$ 间出现一个低谷, 在 $N_{180} \sim N_{240}$ 间出现一个小的峰值, 然后逐渐下降。在半干旱偏旱区的榆林在 $N_0 \sim N_{60}$ 范围内

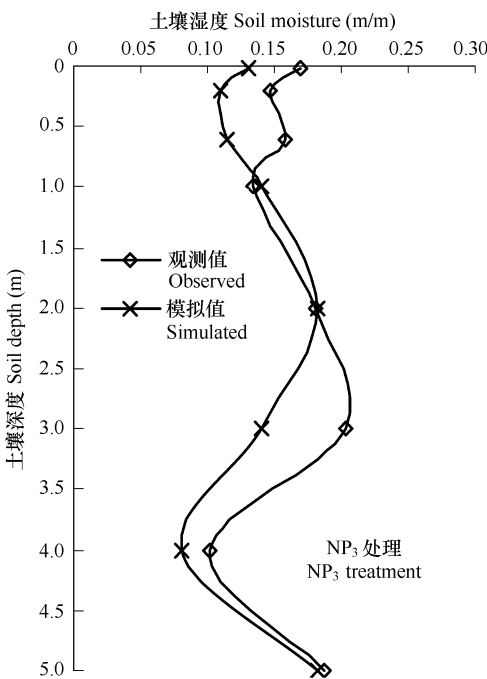


图 2 寿阳地区 NP_3 水平下连作春玉米田土壤剖面湿度模拟值与观测值的比较

Fig.2 Comparison between simulated and observed soil moisture for different sections of continuous spring maize under NP_3 treatment at shouyang

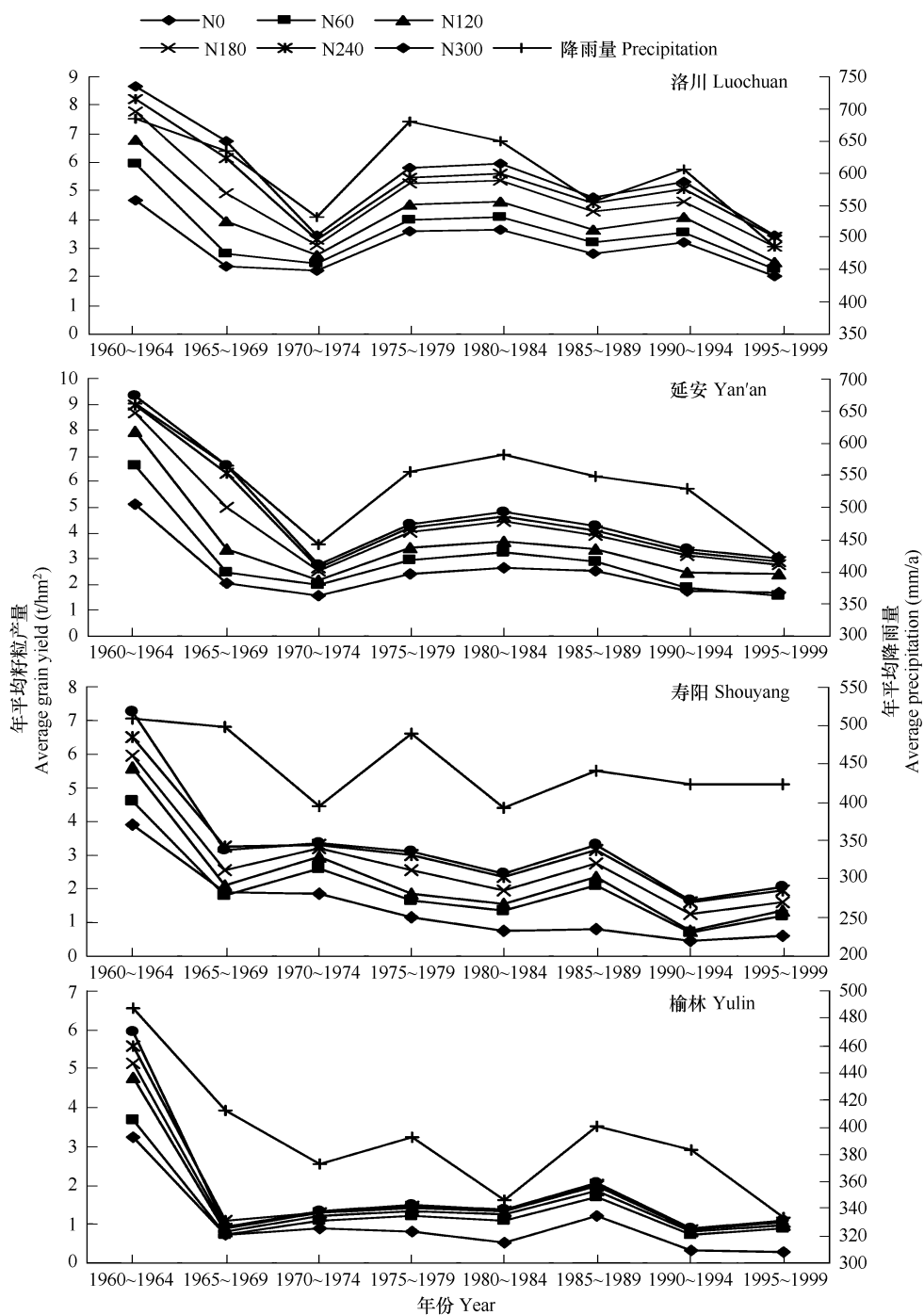


图3 不同地区年平均降水量和不同地区不同肥力水平下连作春玉米年平均产量

Fig. 3 Average precipitation and average spring maize yield under different fertilization treatments in different areas

表4 不同时间段各地区春玉米产量(t/hm²)

Table 4 Spring maize yield in different areas and period

时段 Period	洛川 Luochuan	延安 Yan'an	寿阳 Shouyang	榆林 Yulin
1960 ~ 1969	5.74	6.04	4.05	2.8
1970 ~ 1979	3.82	2.92	2.54	1.24
1980 ~ 1989	4.38	3.71	2.07	1.49
1990 ~ 2000	3.74	2.47	1.41	0.83

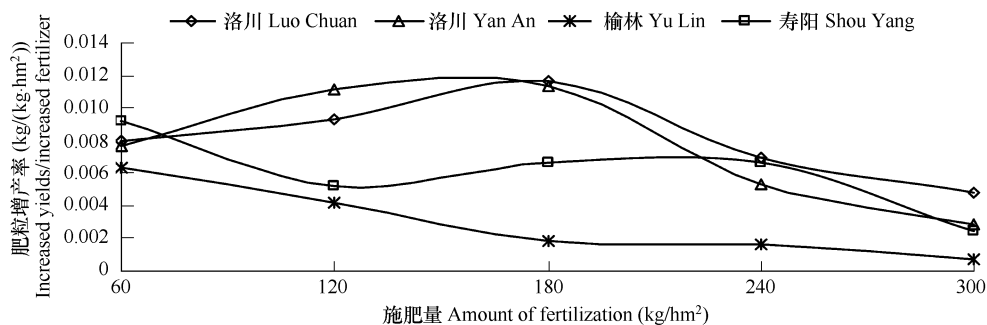


图4 不同施肥范围内的施肥增产率

Fig. 4 Increased rate of yield by fertilizer under different fertilizer range

施肥增产率最大,然后随着施肥量的增加而降低。单从施肥增产效果看,洛川和延安施肥量在 $N_{120} \sim N_{180}$ 范围内最好,寿阳和榆林在 $N_0 \sim N_{60}$ 范围内最好。连作春玉米水分利用效率地区间差异显著,洛川、延安、寿阳、榆林各肥力处理玉米田水分利用效率平均值分别为 12.17、11.95、9.01、6.21 $\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$,洛川 > 延安 > 寿阳 > 榆林;不同肥力处理间差异显著,4 个地区 N_0 、 N_{60} 、 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 、 N_{300} 等 6 个肥力处理的平均值分别为 6.86、8.33、9.59、10.84、11.53、11.86 $\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$,随肥力水平提高春玉米水分利用效率增大(表 5)。不同地区和肥力水平下连作春玉米的水分利用效率比较(图 5)表明四个地区春玉米的水分利用效率随着降水的波动性变化而变化,洛川的 N_{240} 水分利用效率和 N_{300} 差异不明显,其它处理间差异显著;延安的 N_{240} 和 N_{300} 间差异不明显, N_{180} 和 N_{240} 间的差异在模拟前期为显著,在模拟后期为不显著,其它处理间差异显著;寿阳的 N_{180} 、 N_{240} 、 N_{300} 间的差异不显著,其它处理间差异显著;榆林的 N_{180} 、 N_{240} 、 N_{300} 间差异不显著, N_{120} 和 N_{180} 间的差异在模拟前期为显著差异,在模拟后期差异不显著,其它处理间差异显著。单从水分利用效率来看,在半湿润区的洛川连作春玉米适宜施肥量为 $N_{240} \sim N_{300}$,在半湿润偏旱区的延安为 $N_{180} \sim N_{240}$,在半干旱区的寿阳为 $N_{120} \sim N_{180}$,在半干旱偏旱区的榆林为 $N_{60} \sim N_{120}$ 。

表 5 不同地区和肥力水平下连作春玉米水分利用效率平均值($\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$)

Table 5 Average of water use efficiency on continuous spring maize fields under different fertilization treatments in different areas

地区 Area	N_0	N_{60}	N_{120}	N_{180}	N_{240}	N_{300}	平均 Average
洛川 Luochuan	8.92	10.14	11.51	13.26	14.37	14.79	12.17
延安 Yan'an	9.32	9.56	11.44	13.09	13.85	14.43	11.95
寿阳 Shouyang	5.44	7.93	8.94	10.1	10.69	10.97	9.01
榆林 Yulin	3.74	5.69	6.47	6.91	7.2	7.26	6.21
平均 Average	6.86	8.33	9.59	10.84	11.53	11.86	9.84

3.3 不同地区和肥力水平下连作春玉米田逐月土壤有效含水量变化

在 1960 ~ 2000 年的 41 年模拟研究期间,洛川、延安、寿阳、榆林 6 种肥力处理 0 ~ 7m 土层逐月土壤有效含水量模拟平均值分别在 480 ~ 1099mm、459 ~ 1051mm、371 ~ 868mm、357 ~ 805mm 范围内波动,492 个月平均值分别为 576、546、428、392mm,标准差分别为 117、112、67、58mm,变异系数分别为 20.2%、20.4%、14.7%、15.7%,不同地区间差异显著。洛川、延安、寿阳、榆林土壤有效含水量平均值依次降低,变异系数依次变小,说明前两个降水类型区土壤有效含水量较后两个降水类型区多,但其稳定性较后两个降水类型区差。4 个地区的 0 ~ 7m 土层逐月土壤有效含水量均在干旱年份和春玉米生长旺盛期呈现逐渐下降趋势(图 6),而在多水年份和冬闲期得到降水补充和恢复提高,通常以每年 5 ~ 8 月份玉米生长期土壤含水量较低,而 9 月 ~ 翌年 4 月份土壤含水量较高。

随着施肥水平的提高, N_0 、 N_{60} 、 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 、 N_{300} 处理逐月土壤有效含水量在各地区均呈现波动性降低

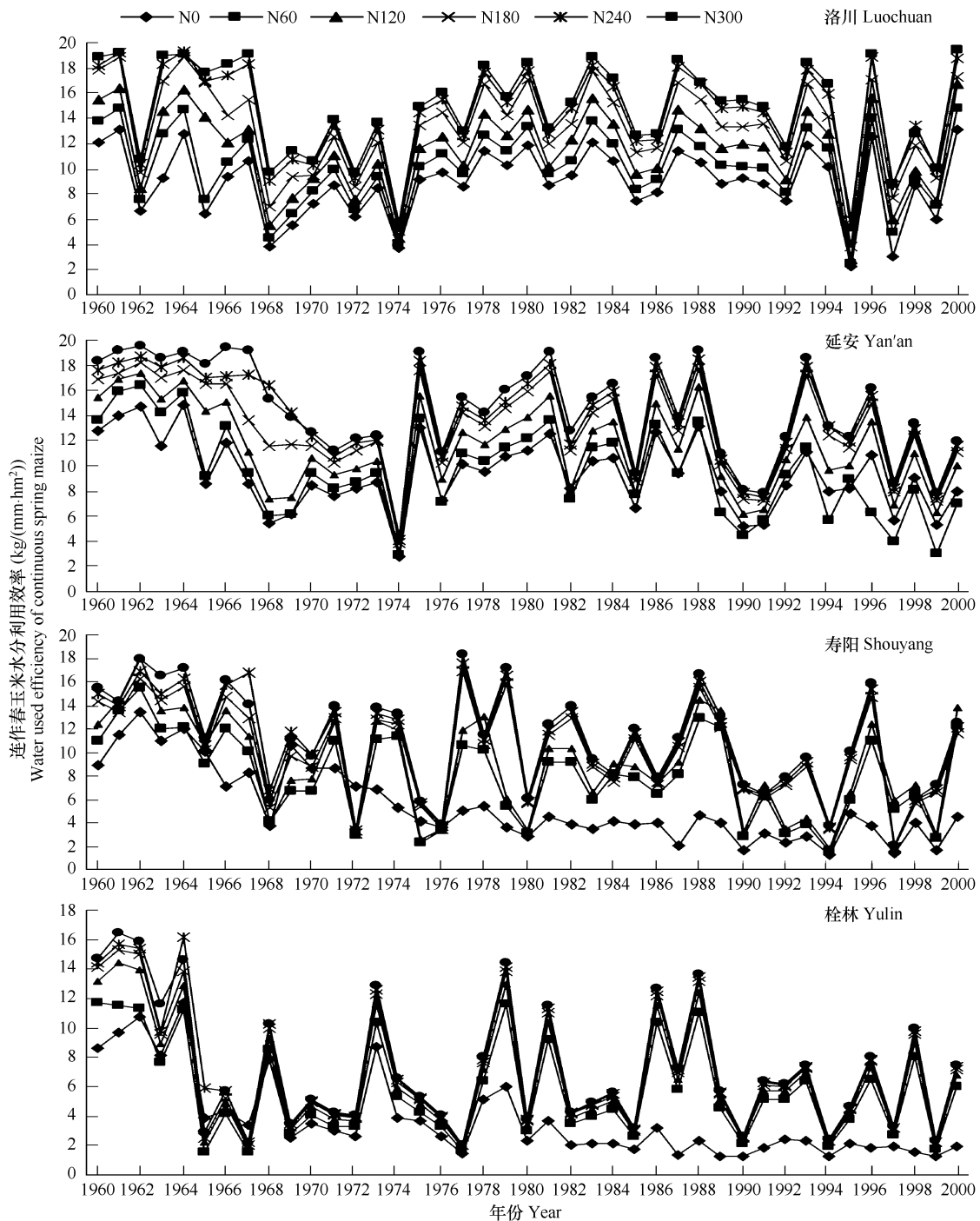


图5 不同地区和肥力水平下连作春玉米的水分利用效率比较

Fig. 5 Comparison for water use efficiency of continuous spring maize under different fertilization treatments in different areas

趋势。N₀、N₆₀、N₁₂₀、N₁₈₀、N₂₄₀、N₃₀₀处理0~7m土层逐月土壤有效含水量4个地区的平均值分别为731、579、456、459、347、340mm,与N₀相比,N₆₀、N₉₀、N₁₂₀、N₁₅₀分别减少152、275、272、384、391mm,肥力水平越高耗水量越大,土壤有效含水量越低。

3.4 连作春玉米田0~7m土层土壤有效水分年度增减量变化

不同地区和施肥处理下连作春玉米田生育期内0~7m土层土壤有效水分年度增减量(年末与年初0~7m土层土壤有效含水量差值,负值为减少,正值为增加)的比较(图7)表明:在1960~2000年模拟研究期间,

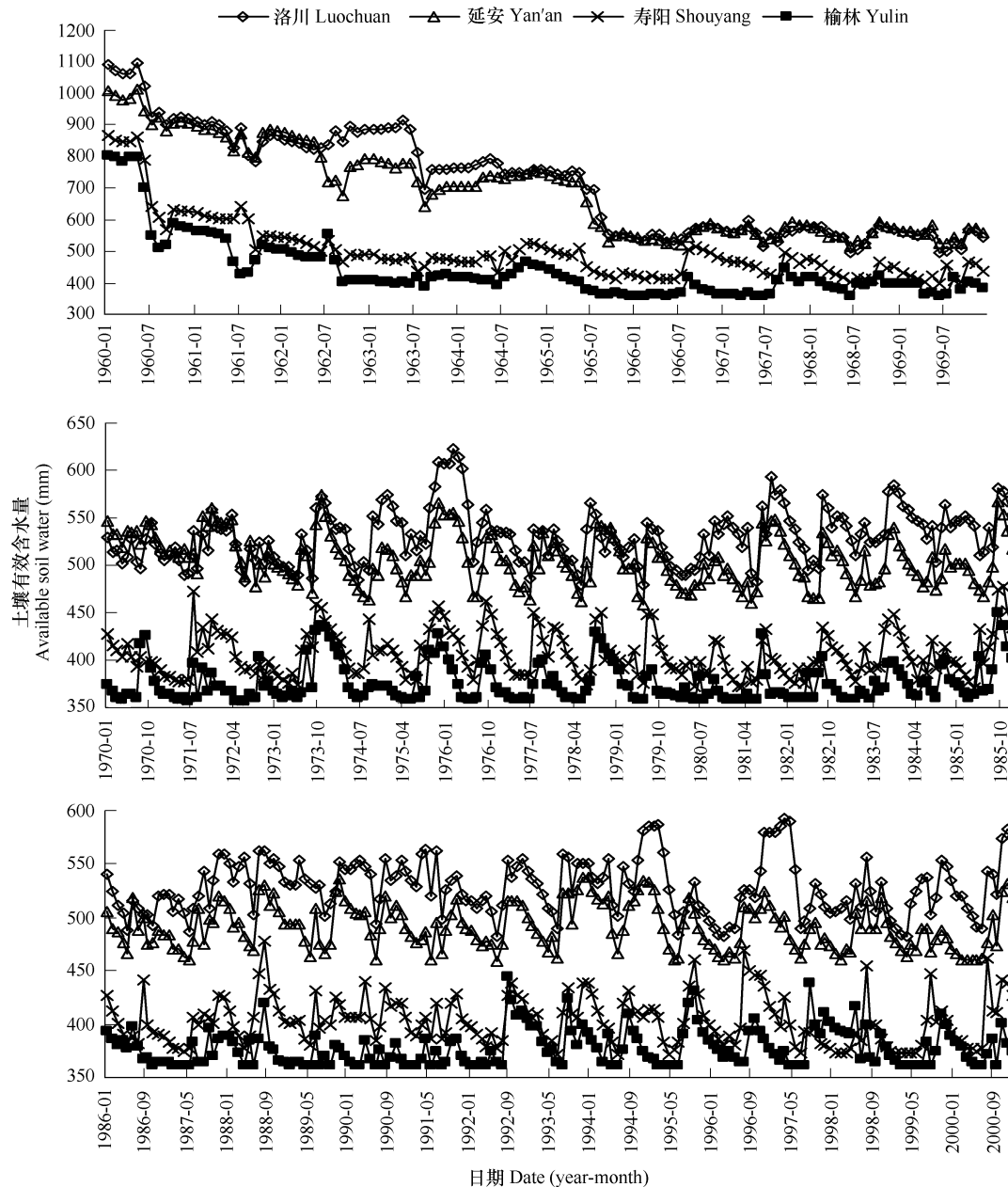


图6 连作春玉米田不同地区0~7m土层逐月土壤有效含水量模拟值变化动态

Fig. 6 Changes of Simulated monthly available soil water amount for continuous spring maize in 0-7m soil layers in different areas

在土壤剖面湿度分布达到稳定状态前(洛川 1973、延安 1972、寿阳 1969 和榆林 1968),不同肥力水平连作春玉米田 0~7m 土层土壤有效水分年度增减量差异明显,平均每年土壤有效水分减少量 N_{60} 、 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 、 N_{300} 处理比 N_0 处理高:在洛川分别为 11.5、22.5、22.5、33.5、33.5 mm,在延安为 28.8、40.6、43.8、54.6、55.7 mm,在寿阳为 19.6、32.2、32.2、43.4、44.1 mm,在榆林为 13.2、25.7、25.7、38.1、38.1 mm;不同地区间差异显著,洛川、延安、寿阳、榆林的平均值分别为 39.5、40.8、44.0、45.2 mm,洛川 < 延安 < 寿阳 < 榆林。在土壤剖面湿度分布达到稳定状态后,不同肥力水平间差异不明显。在半湿润区的洛川和半湿润偏旱区的延安土壤干燥化过程主要发生在前 10a,在半干旱的寿阳和半干旱偏旱的榆林区则主要发生在前 5a。黄土高原地区高肥力条件下连作春玉米的高产是以土壤水分的高消耗为代价的。

3.5 不同地区和肥力水平下连作春玉米田土壤湿度剖面分布变化

在 1960~2000 年模拟研究期间,各地区不同肥力处理土壤剖面湿度分布特征变化过程类似,均在模拟初

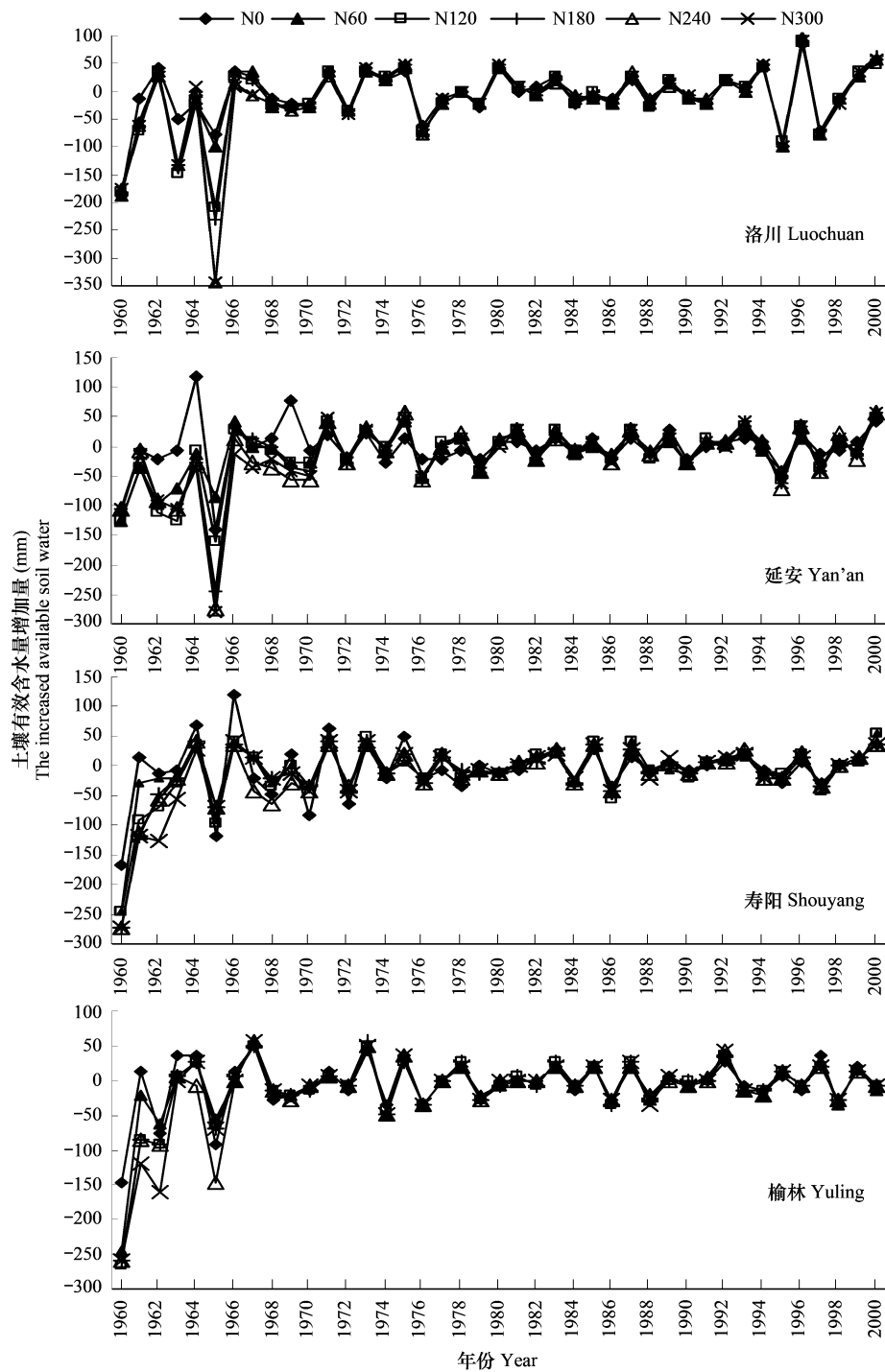


图7 不同地区和肥力水平下连作春玉米田0~7m土层土壤有效水分年度增加量比较

Fig. 7 Comparison for annual changes of available soil water in 0–7m soil profile for continuous spring maize under different fertilization treatments in different areas

期土壤干层逐年加深和加厚,之后形成了稳定的土壤干层,现以洛川 N_{300} 处理为例表示模拟初期、中期和末期土壤湿度剖面分布特征的变化过程(图8)。

对1960~2000年土壤剖面湿度的模拟值进行逐年统计分析,可得到不同地区和肥力水平下连作春玉米田0~7m土壤湿度剖面分布变化统计表(表6)。对土壤剖面湿度分布的逐年模拟值进行统计分析的变量有:土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚过程所经历的时段 SMDDT Period (period for soil moisture decreased

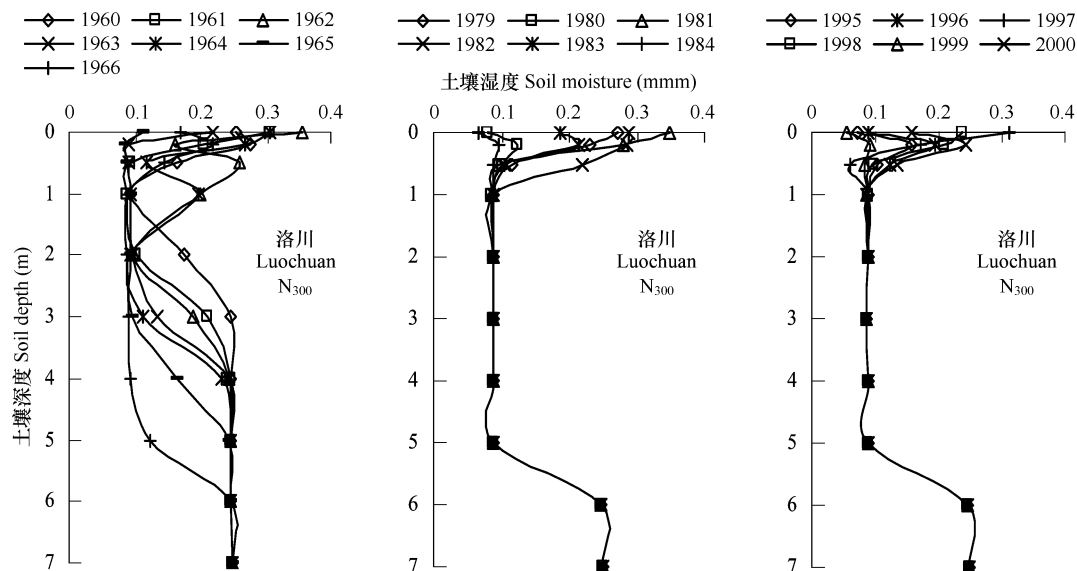


图8 洛川 N_{300} 处理玉米田模拟初期、中期和末期 0~7m 土壤湿度剖面分布特征变化比较

Fig. 8 Comparison of soil moisture distribution in 0-7m soil profile during initial, metaphase and end phase simulation

and desiccated soil layers thickened); 土壤湿度剖面分布达到稳定状态的年份 SSMD Year (year for steady soil moisture distribution in soil profile); 土壤干层最大分布深度 Max DSL (maximum depth of desiccated soil layers); 土壤湿度剖面分布稳定后土壤湿度相对稳定的土层范围 SSL Range (stable soil layer range after steady soil moisture distribution); 土壤湿度达到稳定状态后土壤湿度发生年际变化的土层范围 SMC Range (soil layer range for soil moisture changes); 玉米对土壤水分的最大利用深度 SWU Depth (maximum depth for soil water use); 土壤干层分布范围 DSLD Range (desiccated soil layers distribution range); 土壤干燥化速度 SD Speed (soil desiccating speed)。经统计(表6)表明,在黄土高原地区随着肥力水平和作物产量水平的提高,土壤干燥化程度加剧,土壤干层厚度加深。土壤干层形成的速度洛川>延安>寿阳>榆林。施肥能明显提高作物对深层土壤水分的利用能力,在土壤干层完全形成后,土壤干层分布范围在地区间差异不明显,但不同施肥处理间的差异明显,肥力水平是影响土壤干层最终分布深度的主要因素。

3.6 不同地区玉米田最大土壤水分承载力

在 1960~2000 年模拟研究期间,洛川、延安、寿阳、榆林平均年降水量分别为 605.7、534.2、445.5 mm 和 387.8 mm,洛川春玉米 N_0 、 N_{60} 、 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 、 N_{300} 处理年度耗水量分别为 595.6、599.4、603.3、603.0、605.1 mm 和 607.1 mm,延安分别为 454.6、529.2、533.1、534.0、537.6 mm 和 537.9 mm,寿阳分别为 440.3、442.9、445.4、446.4、449.5 mm 和 449.5 mm,榆林分别为 385.8、386.3、388.6、388.7、391.7 mm 和 391.7 mm,低肥处理玉米年均耗水量稍低于年降水量,高肥处理稍高于年降水量。

土壤水分承载力是指降水资源中补给土壤的年度平均水量所能获得的作物产量^[24],以作物年均耗水量不大于年均降水量为标准,我们认为在洛川、延安、寿阳、榆林玉米田最大土壤水分承载力以 5.25~5.54、4.26~4.58、2.34~2.74、1.37~1.62 t/hm² 为宜,相应的肥力水平为 $N_{240} \sim N_{300}$ 、 $N_{180} \sim N_{240}$ 、 $N_{120} \sim N_{180}$ 、 $N_{60} \sim N_{120}$ 。

综合以上对连作春玉米产量、水分利用效率、肥料增产率、水分承载力等的分析得到连作春玉米在不同地区不同统计指标下的适宜施肥量(表7),在洛川、延安、寿阳、榆林的适宜施肥量分别为 $N_{240} \sim N_{300}$ 、 $N_{180} \sim N_{240}$ 、 $N_{120} \sim N_{180}$ 、 $N_{60} \sim N_{120}$,相应的产量水平为 5.25~5.54、4.26~4.58、2.34~2.74、1.37~1.62 t/hm²。

表 6 不同地区和肥力水平下连作春玉米田 0~7m 土壤湿度剖面分布变化统计

Table 6 Statistics of soil moisture distribution changes in 0-7m soil profile in different area under different fertilization

地区 Area	处理 Treatment	干层形成时段 SMDDT Period	干层分布最大深度 Max DSL (m)	土壤湿度分布稳定年份 SSMD Year	稳定土壤湿度范围 SSL Range (m)	土壤干燥化速度 SD Speed (m/a)	土壤湿度变化土层 SMC Range(m)	最大水分利用深度 SWU Depth (m)	土壤干层分布范围 DSL D Range(m)
洛川 Luochuan	N ₀	1960~1982	2	1996	1~2	0.056	0~1	2~3	1~2
	N ₆₀	1960~1967	3	1971	2~3	0.273	0~2	>4	1~3
	N ₁₂₀	1960~1967	4	1971	2~4	0.364	0~2	>4	1~4
	N ₁₈₀	1960~1967	4	1971	2~4	0.364	0~2	>4	1~4
	N ₂₄₀	1960~1967	5	1972	2~5	0.385	0~2	>5	1~5
	N ₃₀₀	1960~1967	5	1973	2~5	0.417	0~2	>5	1~5
延安 Yanan	N ₀	1960~1981	2	1981	1~2	0.095	0~1	2~3	1~2
	N ₆₀	1960~1966	3	1971	2~3	0.273	0~2	>3	1~3
	N ₁₂₀	1960~1966	4	1971	2~4	0.364	0~2	>4	1~4
	N ₁₈₀	1960~1966	4	1971	2~4	0.364	0~2	>4	1~4
	N ₂₄₀	1960~1966	5	1973	2~5	0.385	0~2	>5	1~5
	N ₃₀₀	1960~1966	5	1973	2~5	0.385	0~2	>5	1~5
寿阳 Shouyang	N ₀	1960~1965	2	1973	1~2	0.154	0~1	2~3	1~2
	N ₆₀	1960~1965	3	1969	2~3	0.333	0~2	>3	1~3
	N ₁₂₀	1960~1965	4	1970	2~4	0.400	0~2	>4	1~4
	N ₁₈₀	1960~1965	4	1970	2~4	0.400	0~2	>4	1~4
	N ₂₄₀	1960~1965	5	1972	2~5	0.417	0~2	>5	1~5
	N ₃₀₀	1960~1965	5	1970	2~5	0.500	0~2	>5	1~5
榆林 Yulin	N ₀	1960~1965	2	1969	1~2	0.222	0~1	2~3	1~2
	N ₆₀	1960~1965	3	1968	2~3	0.375	0~2	>3	1~3
	N ₁₂₀	1960~1965	4	1969	2~4	0.444	0~2	>4	1~4
	N ₁₈₀	1960~1965	4	1968	2~4	0.444	0~2	>4	1~4
	N ₂₄₀	1960~1965	5	1969	2~5	0.556	0~2	>5	1~5
	N ₃₀₀	1960~1965	5	1968	2~5	0.625	0~2	>5	1~5

表 7 不同地区不同统计指标下连作春玉米的适宜产量水平

Table 7 Proper yield of continuous spring maize under different statistical indicators in different area

地区 Locations	产量 Yield(t/hm ²)	肥料增产率 Increased yield/increased fertilizer	水分利用效率 WUE	水分承载力 Water carrying capacity
洛川 Luochuan	4.83~5.54	4.13~4.83	5.25~5.54	5.25~5.54
延安 Yanan	3.58~4.58	3.58~4.26	4.26~4.58	4.26~4.58
寿阳 Shouyang	2.34~3.14	2.74~3.14	2.23~2.74	2.34~2.74
榆林 Yulin	1.37~1.73	0.99~1.37	1.37~1.62	1.37~1.62

4 讨论与结论

黄土高原旱作农田的地下水埋藏较深,一般不直接参与土壤水分循环,因此旱作农田的水分资源实际上只有降水和土壤水两部分。宋尚有等认为玉米产量随着施氮量的增加而提高,施肥增产效果和水分利用效率均以中氮时最好^[23]。黄明斌等认为旱作农田的高生产力是通过改变土壤耗水层深度和降水入渗补给深度实现的^[3]。本文研究结果表明,在 1960~2000 年模拟研究的 41a 期间,洛川、延安、寿阳、榆林的连作春玉米产量因年降水量的依次递减而降低。施肥增产率平均值地区间差异显著,洛川>延安>寿阳>榆林,在不同地区有不同的最大肥料增产率及其取得最大值的适宜肥力水平。水分利用效率平均值地区间差异明显洛川>延安>寿阳>榆林,同一地区内随施肥水平的提高水分利用效率增大。0~7m 土层逐月土壤有效含水量地区间差异显著,洛川>延安>寿阳>榆林。随着施肥水平的提高,逐月土壤有效含水量平均值呈现波动性降低

趋势。土壤干燥化速度 N_0 、 N_{60} 、 N_{120} 、 N_{180} 、 N_{240} 、 N_{300} 依次增大,洛川、延安、寿阳、榆林依次增大。肥力水平是土壤干层最终分布范围的主要影响因素。

综合不同地区不同肥力水平下连作春玉米的产量、水分利用效率、肥料增产率、水分承载力、0~7m 土壤湿度剖面分布情况、0~7m 土壤有效水分增减量,从增产和土壤水分可持续利用角度统筹考虑,在半湿润区的洛川连作春玉米的产量水平以 5.25~5.54 t/hm² 为宜相应的施肥水平以 N_{240} (N 240 kg/hm², P 120 kg/hm²) ~ N_{300} (N 300 kg/hm², P 150kg/hm²) 为宜,在半湿润偏旱区的延安相应的适宜值分别为 4.26~4.58 t/hm², N_{180} (N 180 kg/hm², P 90kg/hm²) ~ N_{240} (N 240 kg/hm², P 120 kg/hm²),在半干旱区的寿阳为 2.34~2.74 t/hm², N_{120} (N 120 kg/hm², P 60kg/hm²) ~ N_{180} (N 180 kg/hm², P 90kg/hm²),在半干旱偏旱区的榆林为 1.37~1.62 t/hm², N_{90} (N 90 kg/hm², P 45kg/hm²) ~ N_{120} (N 120 kg/hm², P 60kg/hm²)。

References:

- [1] Yang W Z, Yu C Z. governing and evaluated in Loess Plateau circumscription. Beijing: Science Press, 1992. 291—294.
- [2] Li Y S. Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of the soil on dryland. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 353—356.
- [3] Huang M H, Dang T H, Li Y S. Effect of advanced productivity in dryland farming of the loess plateau on soil water cycle. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(6): 50—54.
- [4] 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. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2): 54—58.
- [5] Zhou H P, Yang Z P, Li H M, *et al.* Influence of fertilization and rainfall distribution on yield and water use efficiency of maize in dry land. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(3): 27—31.
- [6] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, Spalton D A. The EPIC crop growth model. *Trans ASAE*, 1989, 32(2): 475—511.
- [7] Williams, J. R., P. T. Dyke, W. W. Fuchs, *et al.* EPIC—Erosion/Productivity Impact Calculator; 2. User Manual. USDA Agriculture Technical Bulletin, No. 1768, 1990.
- [8] Texas A&M Blackland Research Center. Researcher's Guide to WinEPIC, Version 1.0. BRC report No. 0406, 2004.
- [9] Bryant K J, Benson V W, Kiniry J R, Williams J R, Lacewell R D. Simulating Corn Yield Response to Irrigation Timings: Validation of the EPIC Model. *Prod. Agric.*, 1992, 5: 237—242.
- [10] Geleta S, Sabbagh C J, Stone J F, Elliot R L, Mapp H P, Bernardo D J, Watkins K B. Importance of Soil and Cropping Systems in the Development of Regional Water Quality Policies. *Environ. Qual.*, 1994, 23: 36—42.
- [11] Parton W J, Ojima D S, Cole C V, Schimel D S. A General Model for Soil Organic Matter Dynamics: Sensitivity to Litter Chemistry, Texture and Management. In *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*, pp. 147—167. SSSA Spec. Public. No. 39. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1994.
- [12] Roloff G, de Jong R, Nolin M C. Crop Yield, Soil Temperature and Sensitivity of EPIC under Central-Eastern Canadian Conditions. *Plant Sci.*, 1998, 78(3): 431—439.
- [13] Roloff G, de Jong R, Zentner R P, Campbell C A, Benson V W. Estimating Spring Wheat Yield Variability with EPIC. *Plant Sci.*, 1998, 78(3): 541—549.
- [14] Wang Z M, Liang Y L. The application of EPIC model to calculate crop productive potentialities in loessic yuan region. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(4): 481—487.
- [15] Chen B, Li J, Li X F. Long term simulation of water potential productivity of Alfalfa on rain-fed high land in south of Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(3): 31—35.
- [16] Li X F, Li J, Wang X C, *et al.* Simulation of water productivity and soil desiccation of Caragana microphylla Shrub land on semi-arid hilly region of the loess plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(3): 113—119.
- [17] Li J, Shao M A, Zhang X C. Simulation equations for soil water transfer and crop use in the EPIC model. *Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2004, 32(8): 21—26.
- [18] The national soil survey and investigation office. Records of Chinese soil survey (vol. 5). Beijing: Chinese Agriculture Press, 1995. 244—254.
- [19] Shanxi Province soil survey and investigation office. Soils of Shanxi Province. Beijing: Science Press, 1992.
- [20] Shaanxi Province soil survey and investigation office. Soils of Shaanxi province. Beijing: Science Press, 1992.
- [21] Li J, Shao M A, Zhang X C. Simulation equations for soil nitrogen and phosphorus transfer and crop nutrition in the EPIC model. *Plant Nutrition*

and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 166–173.

- [22] Wang X C, Li J, Hu W, *et al.* Simulation of yield and soil desiccation effects of continuous spring maize under different level fertilization treatments on Jinzhong semi-arid areas of Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(1): 1–11.
- [23] Yang Z P, Zhou H P, Zhang Q, *et al.* Effects of different fertilizer application counter measures on the soil nitrate nitrogen accumulation in dry land maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 17(6): 49–52.
- [24] Guo Z S, Shao M A. Precipitation, soil water and soil water carrying capacity of vegetation. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5): 522–528.
- [23] Song S Y, Wang Y, Fan T L, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on grain yield, quality and water use efficiency of corn in dry land of Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(3): 387–392.

参考文献:

- [1] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 1992. 291~294.
- [2] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化. *土壤学报*, 2001, 38(3): 253~256.
- [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. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 50~54.
- [4] 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. *中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 54~58.
- [5] 周怀平, 杨治平, 李红梅, 等. 施肥和降水年型对旱地玉米产量及水分利用的影响. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(3): 27~31.
- [14] 王宗明, 梁银丽. 应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试. *自然资源学报*, 2002, 17(4): 481~487.
- [15] 陈兵, 李军, 李小芳. 黄土高原南部旱塬地苜蓿水分生产潜力长期模拟研究. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(3): 31~35.
- [16] 李小芳, 李军, 王学春, 等. 半干旱黄土丘陵区柠条林水分生产力和土壤干燥化效应模拟研究. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 113~119.
- [17] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原地区 EPIC 模型数据库组建. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(8): 21~26.
- [18] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第五卷). 北京: 中国农业出版社, 1995. 244~254.
- [19] 山西省土壤普查办公室. 山西土壤. 北京: 科学出版社, 1992.
- [20] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤. 北京: 科学出版社, 1992.
- [21] 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. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(2): 166~173.
- [22] 王学春, 李军, 胡伟, 等. 黄土高原晋中半干旱区不同肥力水平下玉米产量与土壤干燥化效应模拟. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(1): 1~11.
- [23] 杨治平, 周怀平, 张强, 等. 不同施肥措施对旱地玉米土壤硝态氮累积的影响. *中国农业生态学报*, 2006, 14(1): 122~124.
- [24] 郭忠升, 邵明安. 雨水资源、土壤水资源与土壤水分植被承载力. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 522~528.
- [23] 宋尚有, 王勇, 樊廷录, 等. 氮素营养对黄土高原旱地玉米产量、品质及水分利用效率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3): 387~392.