

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*

李 军^{1,2} 邵明安^{3,2} 张兴昌² 李世清²

(1.西北农林科技大学农学院 杨 陵 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨 陵 712100;3.中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘 要 为了研究黄土高原旱作高产玉米田土壤干燥化与产量波动趋势,利用 EPIC 模型对黄土高原南部旱塬区玉米水分生产潜力和土壤水分动态进行了中期(12 年)和长期(30 年)定量模拟研究。结果表明,在 12a 实时气象条件下的模拟时段内,旱塬地玉米水分生产潜力随降水量变化呈现波动性降低趋势,3m 土层土壤有效含水量也表现为剧烈波动性和逐渐下降趋势,土壤干燥化趋势明显;在 30a 模拟气象条件下的模拟时段内,旱塬地玉米水分生产潜力呈现明显波动性轻微降低趋势,3m 土层土壤有效含水量季节性和年际间波动性剧烈,从长时段看土壤有效含水量呈现略微上升趋势;在降水量减少幅度不显著的情况下,旱塬玉米地土壤干燥化现象只是一种短期过程,通常不会导致长期性土壤强烈干燥化现象发生,但玉米产量随降水量变化的波动性不可避免。

关键词 玉米 水分生产潜力 土壤干燥化 EPIC 模型 黄土高原

Simulation of soil desiccation and yield fluctuation of high yield maize field on rain-fed highland of the Loess Plateau. LI Jun^{1,2}, SHAO Ming-An^{3,2}, ZHANG Xing-Chang², LI Shi-Qing² (1. College of Agronomy, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China), *CJEA*, 2007, 15(2): 54~58

Abstract In order to study the soil desiccation and yield fluctuation of high yield maize on Loess Plateau, the EPIC model was used to simulate water potential productivity (WPP) of spring maize and soil water dynamics on rain-fed highland at Changwu County of the Loess Plateau for a medium term (12 years) assessment and a long term (30 years) forecast simulated research, respectively. The results show that during 12-year real-time weather condition simulation period, WPP of spring maize on rain-fed highland fluctuates and declines along with precipitation changes, crop available soil water amount in 3 m soil layer also fluctuates and declines evidently, and the trend of soil desiccation is remarkable. During 30-year simulated weather condition simulation period, WPP of spring maize on rain-fed highland fluctuates along with precipitation but declines slightly; crop available soil water amount in 3 m soil layer fluctuates seasonally and annually, and has a light increase trend for a long term period. Soil desiccation of maize field on rain-fed highland is a short time phenomenon and usually does not last for long time if the declining trend of precipitation is not distinct, but the fluctuation of maize yield along with precipitation change is inevitable.

Key words Maize, Water potential productivity, Soil desiccation, EPIC model, The loess plateau
(Received Oct. 12, 2005; revised Dec. 26, 2005)

玉米是黄土高原南部高原沟壑区播种面积和总产量仅次于冬小麦的主要粮食作物,其生长期与降水季节吻合性好,高产稳产性优于冬小麦,播种面积趋于扩大。但是,自 20 世纪 90 年代以来,随着全球干旱趋势加剧和水资源短缺态势的日益显现,地处半湿润半干旱气候区的黄土高原,年降水量呈现明显减少趋势,以自然降水为唯一水分来源的广大山塬旱区,旱作玉米田土壤水分收入量不断降低,但同时随着农田土壤肥力和玉米产量的持续提高,旱作农田土壤水分利用量不断提高,土壤水分支出量不断增大,引起旱作高产玉米田土壤水库中有效水分含量持续下降,以深层土壤水分持续亏缺为特征的土壤干燥化已经成为旱地玉米持续高产和稳产的严重隐患,导致旱作高产玉米田产量波动性显著加剧^[1~4]。本研究借助美国研制的作物

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000018605),国家自然科学基金重大项目(90102012),国家自然科学基金项目(40371077, 30471024)

生长模型 EPIC,对旱原地玉米水分生产力及其土壤水分动态进行长期定量模拟试验研究,分析旱作玉米田自然降水、土壤储水和作物用水的基本特征,评价旱作玉米田土壤干燥化与玉米产量波动趋势,为黄土高原南部旱塬区玉米生产的持续发展和旱作农田水分生态环境效应评价提供科学依据。

1 研究方法

EPIC 模型简介。侵蚀和生产力影响计算模型 EPIC(Erosion-productivity impact calculator,又称为环境政策综合气候模型(Environmental policy-integrated climate model))(Williams 等,1984)是美国研制的定量评价“气候-土壤-作物-管理”综合连续系统的动力学模型,能够以(d)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。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。EPIC 模型中作物生长模型是一个多作物通用模型,根据各种作物生理生态过程的共性研制成模型的主体框架,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^[10,11]。EPIC 模型对土壤水分动力学描述较为详细,通过描述降水(包括灌溉水)、入渗、径流、再分布、土壤水分蒸发和作物吸收蒸腾等环节来描述根层土壤水分平衡状况,定量描述土壤水分动态变化及其对产量的影响^[5]。它具有系统性、动态性、机制性、预测性和通用性等特征,有助于人们理解、预测和调控作物生长过程及其生长环境,实现作物持续高产、稳产和高效的目标。

模型应用验证。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。以地处黄土高原沟壑区的中国科学院水利部水土保持研究所武生态试验站为试点,运用 EPIC 模型和当地土壤、实时气象资料^[6]进行了玉米产量与水分利用动态连续模拟试验,获得了 1988~1999 年当地高产栽培管理措施下(与长武试区长期定位试验高肥处理相当)玉米的产量模拟值和收获期土壤有效含水量,模拟值与观测值的统计结果和动态变化比较列于表 1 和图 1~2。其中观测值为长武试区长期定位试验高肥处理玉米产量和土壤有效含水量^[1,2,4,7~9]。表 1 数据显示,1988~1997 年期间春玉米产量模拟值与观测值的多年平均值分别为 7070kg/hm² 和 6533kg/hm²,平均相对误差为 7.6%,模拟平方根误差 RMSE(Root mean square error)为 1561kg/hm²。春玉米产量模拟值与观测值之间呈直线相关关系,相关系数为 0.808,达到显著水平。1988~1999 年期间长武旱塬地玉米田收获期 3m 土层土壤有效含水量模拟值与观测值^[4]的平均值分别为 72.4mm 和 84.0mm,平均相对误差为-16.0%,RMSE 为 34.1mm,二者呈极显著的直线相关关系。

表 1 春玉米产量和土壤含水量模拟值与观测值的统计值比较

Tab.1 Comparison of statistic values of simulated to observed maize yield and soil water amount

项目 Items	1988~1997 年玉米产量 Maize grain yield during 1988~1997			1988~1999 年收获期 3m 土层土壤有效含水量 Available soil water amount in 3m soil layer on harvest seasons during 1988~1999		
	模拟值/kg·hm ⁻² Simulated	观测值/kg·hm ⁻² Observed	相对误差/% Relative error	模拟值/mm Simulated	观测值/mm Observed	相对误差/% Relative error
	平均值	7070	6533	7.6	72.4	84.0
标准差	2577	2378	7.7	104.4	114.8	-10.0
RMSE		1561			34.1	
回归方程	$y = 1347.317 + 0.876x$			$Y = 16.245 + 0.668x$		
相关系数	0.808*			0.831**		

图 1 为春玉米产量模拟值与观测值逐年变化曲线,二者有较为近似的变化趋势,表明 EPIC 模型可以较为精确的模拟春玉米产量,可用于黄土高原玉米产量模拟。1988~1999 年期间长武旱地玉米耗水量模拟值 248~645mm,12 年平均为 454mm。据李玉山等研究^[1],1985~1989 年长武旱地玉米耗水量观测值为 389.5~505.5mm,5 年平均为 452.1mm,玉米耗水量模拟值与实测值之间的相对误差为 0.4%。图 2 显示,长武旱塬玉米田收获期 3m 土层土壤有效含水量模拟值与测定值逐年变化曲线具有十分相似的趋势,表明 EPIC 模型能够较为精确和真实的定量模拟旱塬玉米水分利用和土壤水分动态。

玉米水分生产潜力与土壤水分动态模拟研究方法。本研究采用了 12a 实时气象条件下的中期评价模拟试验和 30a 模拟气象条件下的长期评价模拟试验 2 种研究方案。前者利用长武试区 1988~1999 年实际观

测的 12a 逐日气象要素(太阳辐射、最高气温、最低气温、降水量、相对温度和风速)序列,后者利用 EPIC 模型附带的 WXPARM 软件计算了 1988~1999 年实测逐日气象数据序列的统计参数,再利用 EPIC 中的 WX-GEN 软件模拟生成了 2001~2030 年 30a 逐日气象要素序列^[6,12,13],其他处理完全相同。

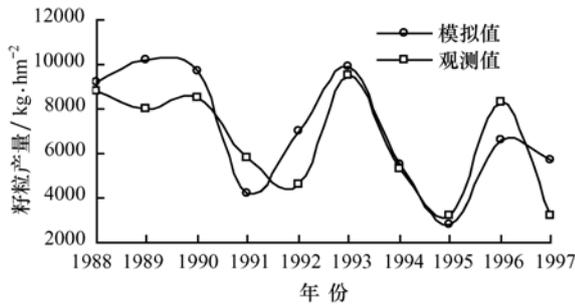


图 1 长武旱塬地玉米产量模拟值与观测值比较

Fig.1 Comparison of simulated to observed maize yield on rainfed highland of Changwu

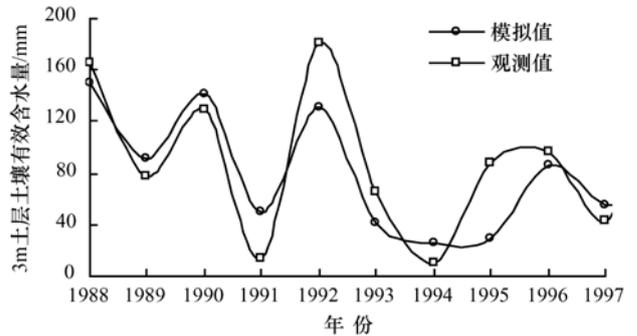


图 2 长武旱塬收获期玉米地土壤水分含量模拟值与观测值比较

Fig.2 Comparison of simulated to observed soil water amount of maize field during harvest on rainfed highland at Changwu

本研究采用模拟方法获得长时段气象资料序列,一方面是因为长武站 30a 以上长时段实测逐日气象要素序列资料难以得到;另一方面也是为了反映 20 世纪 90 年代以来黄土高原气候干暖化趋势对今后较长时段气候变化的可能影响。与 12a 模拟研究时段相比,30a 长时段模拟研究所取得的结果更能反映出旱塬地玉米水分生产潜力的稳定性和土壤水分环境效应的可能生态后果。EPIC 中对逐日温度和降水的预测模拟

分别基于随机发生模型和一重 Markov 链模型,因此本研究中表示 2001~2030 年 30a 模拟降水量、产量和土壤含水量序列的年份只是为了表示时间顺序方便而采用,并非对 2001~2030 年真实时间序列降水量、产量和土壤水分动态的预测。由于 EPIC 模型运行所需要的逐日气象要素、土壤剖面理化性状、玉米生长参数和田间管理措施等模型运行所需数据相当繁杂,限于篇幅,其数据收集整理和模型参数修订方法见文献^[6],这里不再赘述。

2 结果与分析

2.1 12a 实时气象条件下中期评价模拟试验

在 1988~1999 年 12a 实时气象条件下,长武旱塬年降水量为 262.9~724.1mm,平均值为 516.8mm,图 3 中逐年降水量曲线显示,年降水量呈现明显年际波动性降低趋势。前、后 6a 年降水量平均值分别为 576.9mm 和 456.7mm,年均降水量减少 120.2mm,年均降幅 10.0mm,十分罕见。但是研究起始时段的 1988 和 1990 年的年降水量均超过 700mm,远远超过当地多年降水量平均值 584mm,也是导致 12a 间降水减少十分显著的重要原因。

在 1988~1999 年 12a 连续模拟研究时段内,旱塬地春玉米水分生产潜力模拟值为 2810~10 160 kg/hm²,平均值为 7205kg/hm²,标准差为 2416kg/hm²,产量变异系数为 33.5%。图 3 中春玉米水分生产潜力曲线显示,玉米产量呈现剧烈的年际间波动,前 6a 平均值为 8351kg/hm²,后 6 年平均值为 6058kg/hm²,表明研究时段内玉米

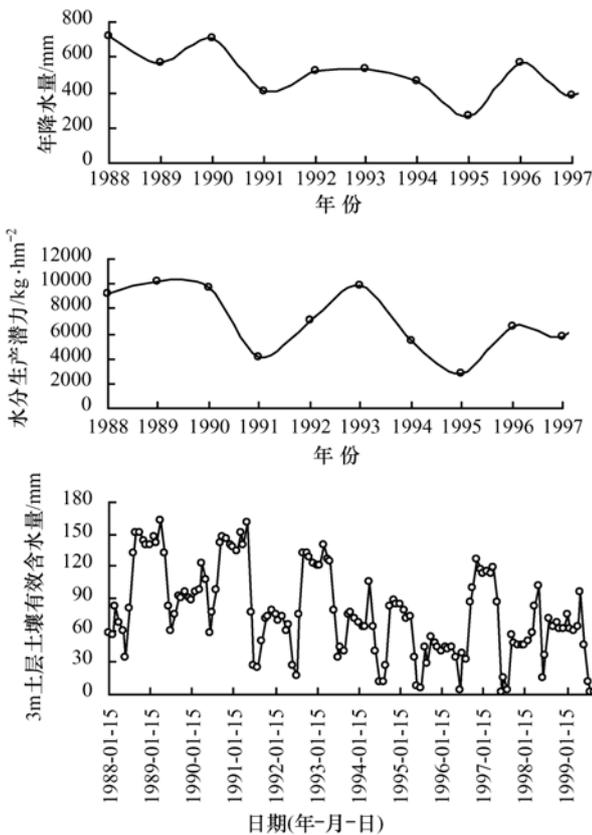


图 3 长武旱塬实时气象条件下降水量、玉米水分生产潜力和 3m 土层土壤含水量变化动态模拟结果

Fig.3 Precipitation, water potential productivity of maize and simulated soil water amount changes of maize field under real time weather conditions on rainfed highland at Changwu

产量随降水量呈现波动性降低趋势。

模拟研究期间,旱塬地春玉米生物量生长遭受干旱胁迫天数多年平均值为 27.0d。在 1988~1999 年 144 个月模拟研究时段内,旱塬地玉米田逐月 3m 土层土壤有效含水量模拟值为 1.26~161.94mm,平均值为 76.11mm,标准差 40.98mm,变异系数 53.8%。图 3 中 3m 土层土壤有效含水量逐月变化动态表明,3m 土层土壤有效含水量随玉米生长利用消耗和雨季降水补充呈现剧烈的年际间和季节性波动,通常以降水量较少的干旱年份和玉米旺盛生长时段的 6~8 月土壤含水量较低,在许多年份这一时段的土壤含水量接近了凋萎湿度,说明旱作高产玉米田土壤水分高强度利用导致了土壤季节性干燥化。另外,在 12a 模拟研究期间,3m 土层土壤有效含水量呈现明显的波动性下降趋势,模拟初期的 1988 年逐月 3m 土层土壤有效含水量平均值为 96.26mm,模拟结束的 1999 年则为 47.63mm,11a 共减少 48.63mm,平均每年减少 4.42mm,显示出了强烈的土壤干燥化趋势。

2.2 30a 模拟气象条件下长期评价模拟试验

图 4 中降水量逐年变化动态曲线显示,模拟生成的长武试区 30a 年降水量介于 309.2~881.2mm 之间,平均值 538.4mm,标准差 123.9mm,年降水量平均值稍高于 1988~1999 年期间实测降水量平均值 516.8mm。其中,2005、2010、2013、2020 和 2029 年等 6a 年降水量均超过 600mm,为丰水年型,并且 2013 年和 2020 年降水量超过 800mm,为特大丰水年型。在模拟研究的 30a 时段内,前、中、后 10a 年降水量平均值分别为 548.2mm、540.6mm 和 526.3mm,年降水量呈现波动性减少趋势,但降幅明显低于 1988~1999 年实时降水量值,后 10a 比前 10a 年降水量平均值减少 21.9mm,年均降幅 1.1mm。同时,模拟研究起始时段的降水量起点相对较低,前 3a 降水量平均值仅为 434.1mm,远低于 1988~1999 年实测降水量序列前 3 年平均值 665.9mm。

在 30a 模拟气象条件下,春玉米水分生产潜力模拟值为 3250~9830kg/hm²,平均值为 7390kg/hm²,标准差为 1950kg/hm²,产量变异系数为 26.4%。图 4 显示,玉米水分生产潜力曲线随降水量的年际波动而发生剧烈波动。前、中、后 10a 玉米水分生产潜力平均值分别为 7583kg/hm²、7105kg/hm² 和 7479kg/hm²,表明旱塬地玉米水分生产潜力随降水量波动性减少而呈现明显波动性轻微降低趋势。玉米生长期耗水量为 270~745mm,耗水量平均值为 470mm,玉米生长期干旱胁迫日数 8.1~54.3d,30 年平均 29.0d,表明玉米生长期遭受较为严重的干旱胁迫。此外,干旱胁迫日数曲线的波动趋势与年降水量和玉米水分生产潜力曲线波动趋势反相对应(见图 4),表明旱塬地高产玉米田水分高强度利用导致了土壤水库蓄水不足,对玉米的供水能力十分有限,玉米生长和产量形成主要依赖于当季降水量,其降水总量及在玉米生育期内的分布决定了旱塬地玉米生长期的干旱胁迫程度和玉米产量的高低。

在 30a 模拟研究时段内,长武旱塬玉米地逐月 3m 土层土壤有效含水量值为 -1.10~178.96mm,360 个月平均值为 79.86mm,标准差 43.24mm,变异系数为 54.1%。其逐月变化动态曲线如图 5 所示。在 30a 模拟研究期间,长武旱塬玉米田 3m 土层土壤有效含水量也呈现剧烈的年际间和季节性波动,2001~2006 年、2011~2013 年、2015~2020 年、2021~2023 年、2026~2028 年等时段土壤有效含水量不足 100mm,一些年份则接近或甚至低于凋萎湿度,而一些多雨年份土壤有效含水量则高于 120~150mm。在 30a 中,前、中、后 10 年内 3m 土层土壤有效含水量平均值分别为 65.31mm、82.77mm 和 90.82mm,表明土壤有效含水量非但没有下降,反而呈现略微上升趋势,并未表现出土壤干燥化逐渐加强趋势,这可能与 30a 中降水量前期相对

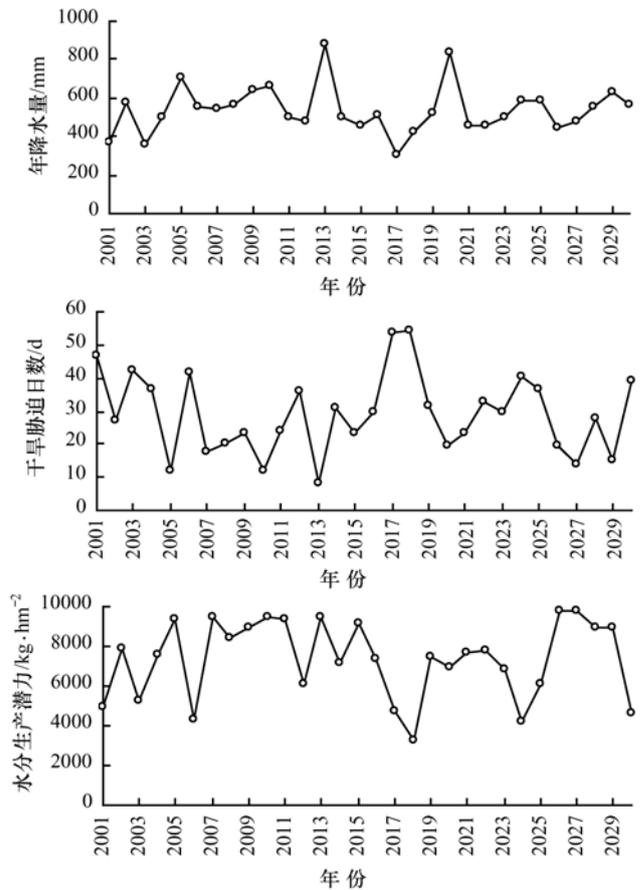


图 4 长武旱塬模拟降水量、玉米生长期干旱胁迫日数与水分生产潜力模拟值

Fig. 4 Simulated precipitation, water stress day number and water potential productivity of maize on rainfed highland at Changwu

较低、中后期相对较高有一定关系。

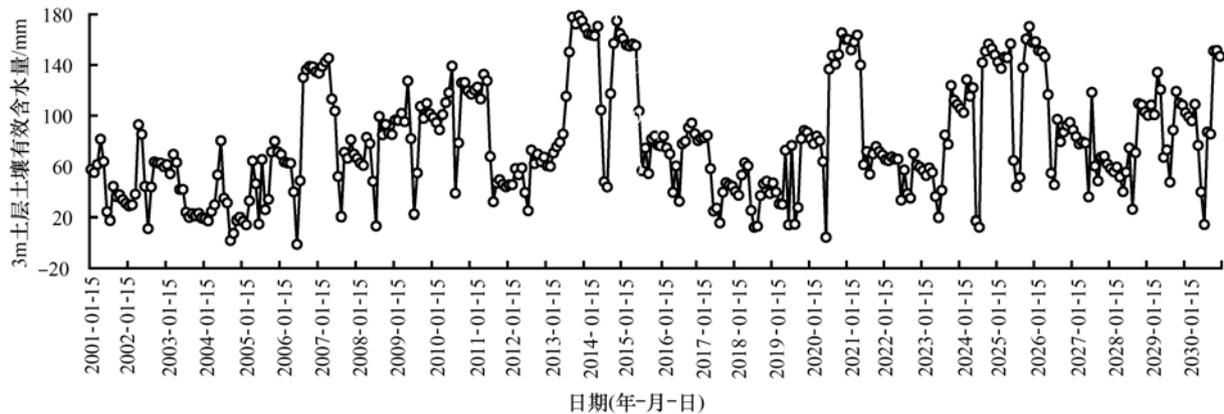


图 5 长武旱塬春玉米 30 年模拟气象条件下 3m 土层土壤有效含水量变化动态模拟结果

Fig.5 Simulated soil water amount changes of maize field under 30-year simulated weather conditions on rainfed highland at Changwu

3 小 结

在 1988~1999 年 12a 实时气象条件下,由于年降水量降幅十分显著,导致黄土高原旱塬地玉米田 3m 土层土壤干燥化趋势明显,旱地玉米产量变异系数高达 33.5%,呈现强烈波动性和显著降低趋势。在 2001~2030 年 30a 年模拟气象条件下,年降水量降幅相对轻微,旱塬地 3m 土层土壤发生了阶段性干燥化现象,但并未表现出 30a 间土壤干燥化逐渐加强趋势,同时玉米产量变异系数为 26.4%,产量波动性稍低于 12a 实时气象条件。由于本研究中所用的 EPIC 模型只能给出 3m 土层土壤有效水分的总体状况,尚不能输出土壤剖面不同土层土壤含水量值,降水入渗深度 2m 以下深层土层土壤干燥化状况有待于今后深入研究。据此可以得出如下结论:一是在黄土高原旱塬地高产玉米田,玉米生长强烈耗水作用导致土壤水库储水量严重亏缺,3m 土层土壤有效含水量平均值仅为 76~80mm,玉米转而完全依靠年度或季节降水维持生长,从而引起玉米生长和产量完全受降水量控制,并随降水量的年际变化出现强烈波动,这是旱塬地高产玉米田土壤水分高效利用所导致的一种必然结果,不可避免。二是在降水较少的干旱年份,土壤有效含水量可能在较低水平上波动,在玉米生长高峰期 3m 土层土壤含水量接近凋萎湿度,连续 3~5a 的干旱年份出现会导致较长时段内土壤干燥化现象,但在多雨年份土壤水分会得到补充,土壤干燥化过程会得到缓解和消除,在长时段内年降水量降低趋势不显著时,通常不会出现土壤含水量越来越低的干燥化加强趋势。

参 考 文 献

- 1 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):353~356
- 2 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
- 3 杨文治,田均良.黄土高原土壤干燥化问题探源.土壤学报,2004,41(1):1~6
- 4 穆兴民,徐学选,陈霁巍.黄土高原生态水文研究.北京:中国林业出版社,2001
- 5 李 军,邵明安,张兴昌.EPIC 模型中农田水分运移与利用的数学模拟.干旱地区农业研究,2004,22(2):72~75
- 6 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
- 7 梁银丽,党廷辉,张成娥.黄土区农田生态系统生产力研究.西安:陕西科学技术出版社,2000
- 8 郝明德,梁银丽.长武农业生态系统结构、功能及调控原理与技术.北京:气象出版社,1998
- 9 李玉山,苏陕民.长武王东沟高效生态经济系统综合研究.北京:科学技术文献出版社,1991
- 10 Williams J.R.The EPIC model.Blackland Research Center,Texas A & M University,USA,1995
- 11 Williams J.R.,Dyke P.T.,Fuchs W. W. *et al.* EPIC—Erosion/Productivity Impact Calculator;2. User Manual. USDA Agriculture Technical Bulletin No.1768,1990
- 12 Richardson C.W.Data requirements for estimation of weather generation parameters.Transaction of ASAE,2000,43(4):877~882
- 13 Soltani A.,Latifi N.,Nasiri M.Evaluation of WGEN for generating long term weather data for crop simulations.Agricultural and Forest Meteorology,2000,102(1):1~12