

洛阳旱地夏玉米生产潜力长周期定量模拟与评价

姜志伟¹, 武雪萍^{2,*}, 华 珞¹, 蔡典雄², 逢焕成², 吴会军², 姜 涛³,
郑 妍², 李银坤²

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;
3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002)

摘要:以洛阳孟津地区气象数据库、土壤数据库、作物数据库和多年田间试验数据库为基础,应用 DSSAT 作物生长模型估算了当地夏玉米光温生产潜力和光温水生产潜力,并对节水潜力开发现状及途径进行了分析。结果表明,洛阳孟津地区 47a 夏玉米光温生产潜力为 6900.00 ~ 15805.00 kg·hm⁻²,均值为 12039.96 kg·hm⁻²,可作为补灌区平均最高产量的上限参考值;光温水生产潜力为 1529.31 ~ 13742.00 kg·hm⁻²,均值为 8894.42 kg·hm⁻²,仅占光温生产潜力 82% 左右,可作为雨养夏玉米平均最高产量的上限参考值。夏玉米生育期内平均降水量为 356.22mm,年际间波动幅度较大,平均水分满足率为 71.9%,不同土壤类型及不同降雨年型夏玉米潜在水分利用效率变幅较大,波动范围为 8.04 ~ 37.46 kg·hm⁻²·mm⁻¹,47a 均值为 26.424 kg·hm⁻²·mm⁻¹。近 8a 旱作夏玉米现实水分利用效率仅占潜在水分利用效率的 45.87%,平均光温水生产潜力开发度为 47.55%。夏玉米节水潜力非常大,采用合理的节水农业措施,加强农田建设,改善地力状况,增强土壤储水蓄水稳定能力,高效利用降水资源,提高水分利用效率是今后提高夏玉米产量的重要途径。

关键词:DSSAT 模型;夏玉米;生产潜力;潜在水分利用效率;开发度

文章编号:1000-0933(2009)01-0315-10 中图分类号:Q141, S162.5, S314, S513 文献标识码:A

Long-period quantitative simulation and evaluation of summer maize potential productivity in Luoyang dryland

JIANG Zhi-Wei¹, WU Xue-Ping^{2,*}, HUA Luo¹, CAI Dian-Xiong², PANG Huan-Cheng², WU Hui-Jun², JIANG Tao³, ZHENG Yan², LI Yin-Kun²

1 The College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3 Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0315 ~ 0324.

Abstract: The DSSAT crop growth model was applied to estimate the summer maize potential photo-temperature productivity and photo-temperature-precipitation productivity, based on a database containing weather, soil, crop varieties, and field trial information from Mengjin in Luoyang. The potential productivity development status as well as the development approach was analyzed. The results show that the range of photo-temperature productivity of summer maize was 6900.00 — 15805.00 kg·hm⁻², and the mean 12039.96 kg·hm⁻², which can be used as reference value of average maximum yield in irrigated fields. The range of photo-temperature-precipitation productivity was 1529.31 — 13742.00 kg·hm⁻², and the mean 8894.42 kg·hm⁻², which accounted for a photo-temperature productivity of 82%, and can be used as the reference value of average maximum yield in rainfed fields. The average precipitation was 356.22 mm during the summer maize development period,

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(2007CB109305);国家 948 国外技术引进与创新研究资助项目(2006-G52A-03);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2007-14);国家“863”计划资助项目(2006AA100220);国家 948 引进国际先进农业科学技术重点资助项目(2006-G56);国际科技合作资助项目(2006DFB32180)

收稿日期:2008-06-13; 修订日期:2008-09-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xpwu@caas.ac.cn

with large annual fluctuations. The water content ratio was 71.9%. Due to different soil types and rainfall years, the range of summer maize potential water use efficiency was $8.04 - 37.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$; the mean was $26.424 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ for 47 years. During the past eight years, summer maize actual water use efficiency only accounted for 45.87% of the potential water use efficiency, and the average development degree of potential photo-temperate-precipitation productivity was 47.55%. The investigation showed that the water-saving potential of summer maize is very large. In the future, it is quite important to use water-saving agriculture measures reasonably and precipitation resources efficiently, to improve the field environment, enhance the stability of the soil water storage capacity, so as to increase water use efficiency and summer maize production.

Key Words: DSSAT model; summer maize; potential productivity; potential water use efficiency; development degree

洛阳孟津位于北纬 $34^{\circ}50'$, 东经 $112^{\circ}26'$, 平均海拔 323.3m, 地处豫西旱区的腹地, 属半湿润偏旱类型区, 山区占 45.5%, 丘陵占 40.7%, 平原占 13.8%。耕地面积 42.70 万 hm^2 , 丘陵旱地占 70% 以上。该地区四季分明, 光热充沛, 年均温 14.6°C , 年均降雨量 646.2mm, 全年无霜期 218d, 总体来说对各种农作物生长十分有利。但是, 近年来相关研究表明, 洛阳地区年降水在 450 ~ 520mm 的年份达 80% 以上, 作物生长表现为一季有余, 两季不足, 干旱发生频率较高, 平均在 40% 以上, 旱作农田在一般情况下难以实现一年两熟, 不能充分发挥光热资源。

近年来, 许多科研人员针对以提高资源利用效率为目标的农业生产做了大量的研究工作, 也取得了明显成效^[1-4]。但是, 洛阳地区作物真正可利用的光温水资源到底有多少, 目前已经达到多大的开发程度, 通过增加物质和科技投入又能实现多大的开发潜力, 这些都还显得不很清晰。我国科研人员已对作物生产潜力做了不少研究, 对农业生产起到很好的指导作用。但是, 以前作物生产潜力的研究主要是基于大区域的, 缺乏区域内部气候资源时空分布差异的考虑, 对具体小区域无法起到明确具体的指导作用。同时, 这些研究多以公式概算为主, 缺乏长周期变化规律的探讨和对作物自身的遗传特性与气候、土壤、管理措施等因素综合作用的考虑, 大大削弱了对农业生产的指导作用和现实可行性。

为此, 应用一个更加注重光、温、水、土以及作物生长发育机理等因素的综合作用, 更加突出生产潜力形成的主体及其与影响因素的响应机制的模型来评估该地区作物生产潜力显得更为适用和迫切。出于这种考虑, 本研究采用 DSSAT 作物生长模型, 利用 47a 气象数据、土壤、作物数据和田间试验数据对孟津地区主产作物(夏玉米)进行了生产潜力的模拟研究, 探讨夏玉米生产潜力开发程度及节水潜力, 以期为该地区合理利用自然资源、发展节水农业提供理论依据。

1 DSSAT 模型简介

农业技术转移决策支持系统 DSSAT(decision support system for agro-technology transfer)是在农业技术转移国际基准网 IBSNAT(international benchmark sites network for agro-technology transfer)计划的资助下开发研制出来的综合计算机系统^[5,6]。DSSAT 模型是由作物模拟模型支持的决策支持系统, 除了数据支持以外, 还提供了计算、解题的方法, 并为决策者提供决策的结果。DSSAT 能通过作物模拟技术和系统分析方法估测作物的产量, 为农民在不同气候年景下采取不同的栽培管理措施(如作物的合理施肥、灌水)提供科学的决策^[7]。从 20 世纪 80 年代中期起, IBSNAT 将 DSSAT 向世界上 30 多个国家与地区推广应用, 又将应用结果反馈回来, 使作物模型不断改进和完善, 其目的是加速农业技术的推广和为发展中国家合理有效地利用自然资源提供决策和对策。

经过 10 多年的检验、改进和发展, 模型现在已经发展到 DSSAT4.0 版本(本研究采用 DSSAT4.0.2 版本), 可对 26 种不同作物进行模拟研究。作为田间尺度的农业决策支持系统, DSSAT 在作物模拟模型的基础上研究田间单一作物状态, 通过灌溉和施肥的决策, 模拟预测在不同气候和土壤条件下作物的生长、发育和产量。

2 作物生产潜力模拟研究数据库建立

DSSAT 模型以日为时间步长模拟各种作物在某一地点实施单一或多季节农田管理方式下整个生育期内的生长发育和产量形成过程,以及土壤水分、碳氮过程和管理实践^[5]。该模型的良好应用,首先需要逐日气象数据、土壤剖面数据、作物品种遗传参数数据以及农田管理实践数据等基础数据的支持。

2.1 气象数据

DSSAT 模型中设置有逐日气象要素变量以进行逐日作物生理生态数据计算和模拟。最基本(最少)的一组逐日气象要素(变量)是逐日太阳辐射量($SRAD$)、逐日最高气温(T_{MAX})、逐日最低气温(T_{MIN})和逐日降水量($RAIN$)。针对研究需要,本研究收集整理了洛阳孟津地区 1961~2007 年气象数据。在逐日太阳辐射量获取困难的情况下,根据该地区的逐日日照时数及其相关天文参数,利用 $Q = Q_0(a + bS/S_0)$ 经验公式估算了逐日太阳辐射量。公式计算孟津太阳辐射量结果与同纬度的郑州气象站点实测结果(由中国气象局国家气象信息中心提供)进行对比分析表明,月平均误差为 11.9%,公式计算值与实测值吻合度较高。

2.2 土壤数据

DSSAT 模型要求输入农田土壤剖面层次的理化性状数据。收集整理了洛阳孟津地区典型土壤相关参数数据,主要包括土壤名称、土壤质地、剖面土层数目、农田坡度(%)、土壤颜色、各土层粘粒、粉砂粒和砂粒含量(%)、>2mm 石砾含量、各层土壤有机碳含量(%)、各土层养分含量、各土层阳离子交换量 $CMC(\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1})$ 以及各土层 pH 值等。

本研究收集了占洛阳市耕地面积比重较大的典型农作土壤褐土和潮土各土属剖面数据。

2.3 作物参数调试与数据

根据 1999 年~2007 年夏玉米试验观测结果,采用“试错法”^[8]对作物品种参数进行调试,直至模型模拟输出结果与实测值吻合。经数千次调试,最终确定洛玉

2 号作物品种参数(表 1),并应用该作物品种参数进行了产量模拟值与实测值一致性检验。

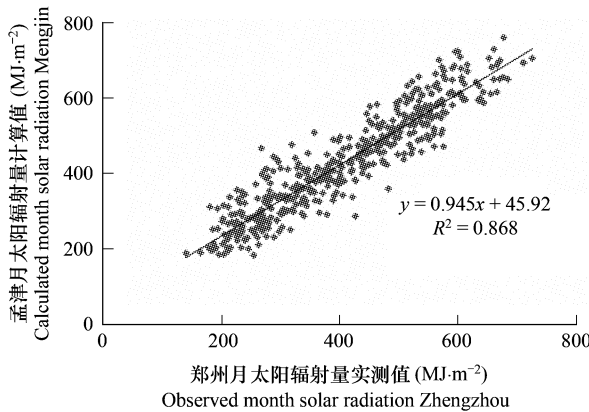


图 1 同纬度地区月太阳辐射量计算值与实测值(1965~2003 年)
Fig. 1 The agreement of observed and calculated month solar radiation at same latitude area (1965-2003)

表 1 夏玉米作物品种遗传参数

Table 1 The value of genetic parameter on summer maize

作物 Crop	品种 Cultivar	参数 Parameter					
夏玉米 Summer maize	洛玉 2 号 Luo Yu 2	P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
		200	0.7	860	700	11.0	38.00
参数范围 ^[8-10] Range of parameter ^[8-10]		100~500	0.0~1.0	500~900	500~900	4.0~12.0	35~55

P1: 幼苗期生长特性参数 degree days from emergence to end of juvenile phase; P2: 光周期敏感系数 photoperiod sensitivity coefficient; P5: 灌浆期特性参数 degree days from silking to physiological maturity; G2: 单株最大穗粒数 potential kernel number; G3: 潜在灌浆速率参数 potential kernel growth rate; PHINT: 出叶间隔特性参数 degree days required for a leaf tip to emerge

本文引入归一化均方根差 RMSE(the normalized root mean square error)来度量模拟值与实测值的相对差异程度,一致性指数 d (the index of agreement)和相关系数 r 来检验模拟值和实测值的吻合度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{M}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right]$$

式中, P_i 为模拟值, O_i 为实测值, M 为实测值平均值, $P'_i = P_i - M$, $O'_i = O_i - M$ 。

一般认为, RMSE 小于 10% 为极好, 大于 10% 小于 20% 为好, 大于 20% 小于 30% 为中等, 大于 30% 为差。 d 和 r 值越接近于 1, 说明模拟值和实测值一致性越好, 否则相反。

2005 年洛玉 2 号不同种植密度处理实验结果和模型模拟结果表明, 归一化均方根差 RMSE 为 1.7%, 一致性指数 d 为 0.97, 相关系数 r 为 0.97。夏玉米模拟结果均达到理想指标, 其品种参数能够准确地反映实际作物品种的主要遗传特征, 可以应用于作物生产潜力模拟研究。

3 夏玉米生产潜力模拟结果与分析

利用气象数据、土壤数据、作物品种遗传参数数据以及多年的田间试验数据, 应用 DSSAT 模型对夏玉米光温生产潜力和光温水生产潜力进行估算。夏玉米模拟生育期时段为 6 月 2 日种植, 至 9 月 16 日左右成熟收获, 种植密度为 $4.5 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$, 模拟运行 47a, 重复 4 次。

3.1 光温生产潜力

模拟结果表明, 夏玉米光温生产潜力总体较大, 但不稳定性突出, 波动范围为 $6900.00 \sim 15805.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 均值为 $12039.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 标准偏差为 $1983.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 变异系数为 0.16。生育期累积太阳辐射量变化趋势总体比较稳定, 均值为 $1840.03 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 标准偏差为 $151.49 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 波动范围为 $1438.20 \sim 2128.70 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 变异系数为 0.08。生育期积温变化比较稳定, 均值为 $2706.89^\circ\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$, 标准偏差为 $66.06^\circ\text{C} \cdot \text{d}$, 波动范围为 $2405.00 \sim 2804.40^\circ\text{C} \cdot \text{d}$, 变异系数为 0.02。

生育期太阳辐射量和积温对夏玉米光温生产潜力的影响主要是通过对其生物量累积过程的影响来体现。以 2002 年夏玉米生长季为例, 日光温累积生物量 (Y_1) 与生育期日累积太阳辐射量 (X_1) 和日积温 (X_2) 回归分析表明, 其复相关系数为 0.98, 拟合方程为 $Y_1 = -4707.3 + 24.2X_1 - 6.6X_2$ 。太阳辐射量与作物光合作用联系紧密, 太阳辐射量的多少决定着光能转化和生物量累积的程度, 而温度直接影响作物生长发育的速度, 进而影响作物生育期的长短和生育期内光合时间的多少, 尤其是对作物灌浆的影响。作物光温生产潜力的高低是太阳辐射和温度综合作用的结果。如 2001 年夏玉米生长期第 49 天至第 68 天太阳辐射量持续偏低, 导致在生育期日均温偏高条件下累积生物量偏低, 而造成光温生产潜力低下。

此外, 作物本身的遗传特性、作物种植密度等其它因素对光温生产潜力也同样产生一定的影响。

据洛阳市农业科学院夏玉米高产栽培试验表明^[11], 补灌区产量可达 $10053.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 这一高产记录可达到光温生产潜力的 84.5%。而对于孟津地区旱作夏玉米来说, 平均产量在 $5000 \sim 8000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 仅达到光温生产潜力的 41.5% ~ 66.4%。由此可见, 洛阳孟津地区补灌区玉米光温生产潜力可获得较高的开发度, 而对于大面积无法实现补灌的区域光温开发的潜力空间很大。

3.2 光温水生产潜力

为深入研究孟津地区夏玉米光温水生产潜力 (也称气候生产潜力), 选择褐土和潮土的 13 个土属进行分析。表 2 为 1961 ~ 2007 年孟津地区不同土壤类型夏玉米光温水生产潜力模拟结果, 该结果体现了不同土壤类型夏玉米光温水生产潜力差异程度, 同时也说明了不同土壤类型的可开发利用潜力。

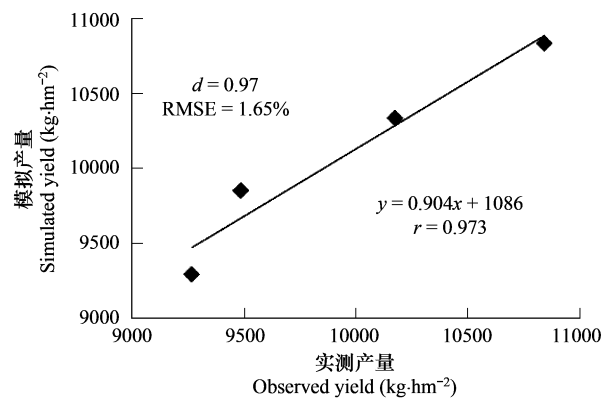


图2 2005 年洛玉 2 号不同种植密度处理产量模拟值与实测值
Fig. 2 Observed and simulated yield of Luoyu 2 under different plant population conditions in 2005

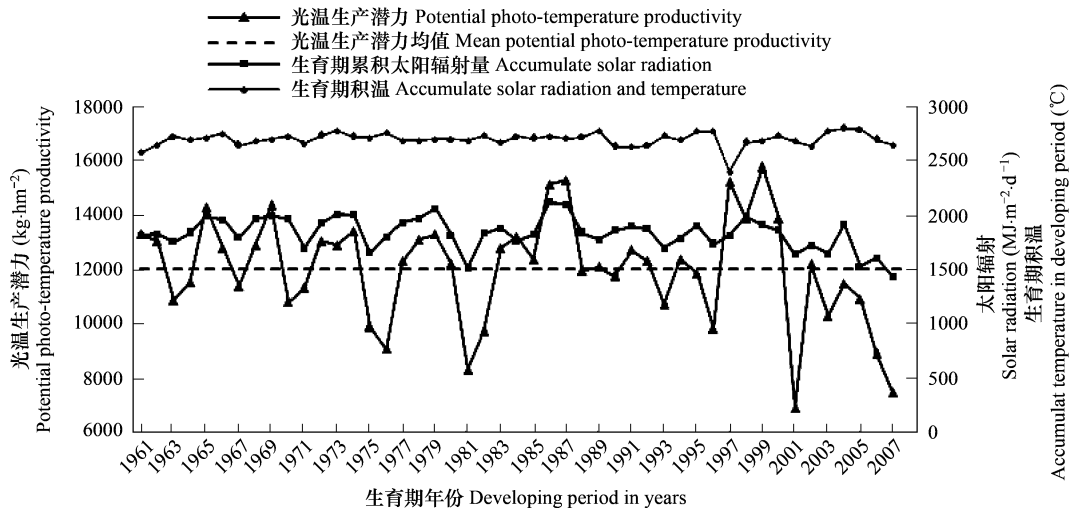


图3 不同年份夏玉米光温生产潜力及生育期累积太阳辐射量、积温变化

Fig. 3 Summer maize potential photo-temperature productivity and accumulate solar radiation and temperature in developing period during 1961—2007

表2 不同土壤类型夏玉米生产潜力模拟结果

Table 2 The summer maize potential productivity on different soil type during 1961—2007 (kg·hm⁻²)

生产潜力 Potential productivity	均值 Mean	标准偏差 Standard error of estimate	范围 Range
光温生产潜力 Potential photo-temperature productivity	12039.96	1983.728	6900 ~ 15805
黄土质褐土光温水生产潜力 Loess cinnamon soils potential photo-temperate-precipitation productivity	9594.468	2930.709	1721 ~ 13903
洪积褐土光温水生产潜力 Diluvial cinnamon soils potential photo-temperate-precipitation productivity	9321.319	3054.475	1453 ~ 13894
红黄土质褐土光温水生产潜力 Red- loess cinnamon soils potential photo-temperate-precipitation productivity	8895.787	3081.812	1792 ~ 13894
黄土质石灰性褐土光温水生产潜力 Loess calcic cinnamon soils potential photo-temperate-precipitation productivity	8846.745	3065.781	1675 ~ 13894
洪积石灰性褐土光温水生产潜力 Diluvial calcic cinnamon soils potential photo-temperate-precipitation productivity	10041.21	2697.06	1881 ~ 13903
红黄土质石灰性褐土光温水生产潜力 Red- loess calcic cinnamon soils potential photo-temperate-precipitation productivity	7058.128	3497.024	393 ~ 13238
洪积潮褐土光温水生产潜力 Diluvial aquic cinnamon soils potential photo-temperate-precipitation productivity	9321.319	3054.475	1453 ~ 13894
废墟潮褐土光温水生产潜力 Ruins aquic cinnamon soils potential photo-temperate-precipitation productivity	8441.787	3181.612	1919 ~ 13805
覆盖褐土性土光温水生产潜力 Mantle weakly developed cinnamon soils potential photo-temperate-precipitation productivity	9975.851	2729.068	1826 ~ 13903
壤质潮土光温水生产潜力 Loam fluvo-aquic soils potential photo-temperate-precipitation productivity	8470.596	3015.34	1881 ~ 13752
洪积潮土光温水生产潜力 Diluvial fluvo-aquic soils potential photo-temperate-precipitation productivity	7574.426	3289.858	834 ~ 13238
粘质灌淤潮土光温水生产潜力 Clay cumulated irrigated fluvo-aquic soils potential photo-temperate-precipitation productivity	9941.17	2835.528	1417 ~ 13903
壤质脱潮土光温水生产潜力 Loam demoisted fluvo-aquic soils potential photo-temperate-precipitation productivity	8144.66	3122.961	1636 ~ 13425

模拟结果表明,各土壤类型夏玉米光温水生产潜力均值为 $8894.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,标准偏差为 $3072.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,变化范围为 $1529.31 \sim 13742.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,变异系数为 0.35,生育期年份间光温水生产潜力差异明显。除红黄土质石灰性褐土和洪积潮土外,其它各土壤类型夏玉米光温水生产潜力均值均在 $8000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上。占孟津耕地面积比重较大的三大土壤类型中,黄土质褐土平均光温生产潜力为 $9594.47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,标准偏差为 $2930.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,波动范围为 $1721.00 \sim 13903.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,变异系数为 0.31。洪积褐土光温生产潜力均值为 $9321.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,标准偏差为 $3054.47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,波动范围为 $1453.00 \sim 13894.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,变异系数为 0.33。红黄土质褐土光温生产潜力均值为 $8895.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,标准偏差为 $3081.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,波动范围为 $1792.00 \sim 13894.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,变异系数为 0.35。模拟结果较为客观地反映了孟津地区夏玉米光温水生产潜力的整体水平。

夏玉米生育期太阳辐射量、气温和降水量对其光温水生产潜力的影响主要通过对其生物量的累积过程来体现,如 2002 年日光温水累积生物量(Y_2)与生育期日累积太阳辐射量(X_1)、日积温(X_2)和日降水量(X_3)回归分析表明,其复相关系数为 0.98,拟合方程为 $Y_2 = -2386.5 + 1.9X_1 + 6.8X_2 - 18.2X_3$ 。相对于生育期累积太阳辐射量和积温,生育期降水量年际间波动较大,对光温水生产潜力的影响更为突出(图 4)。

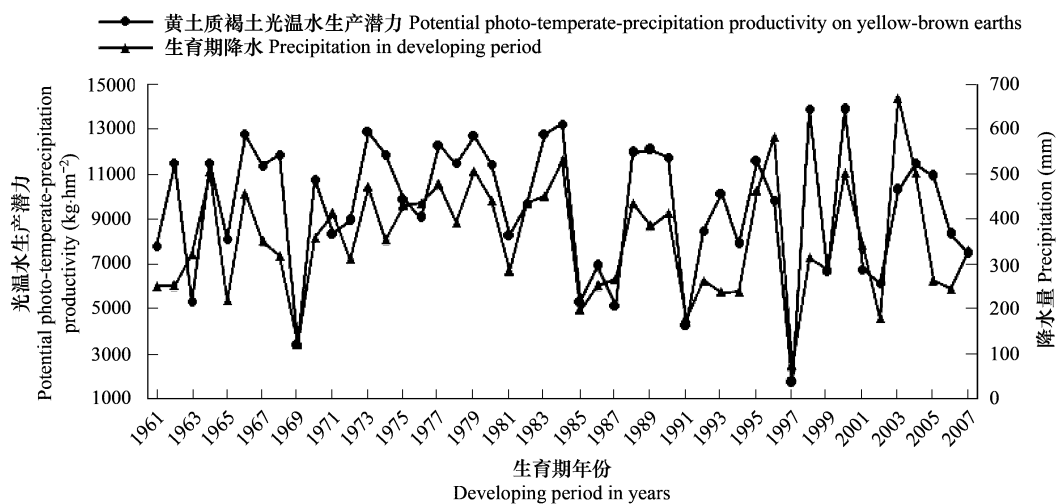


图 4 典型土壤夏玉米光温水生产潜力与生育期降水量关系

Fig. 4 The relationship between summer maize potential photo-temperature-precipitation productivity and precipitation on typical soil

3.3 光温生产潜力与光温水生产潜力对比分析

47a 不同土壤类型光温水生产潜力年际变化幅度各有不同,但总体变化规律是一致的。现仅以孟津地区主要土壤类型黄土质褐土光温水生产潜力来说明夏玉米光温生产潜力与光温水生产潜力之间的关系。

由图 5 可知,夏玉米光温生产潜力与光温水生产潜力比率在 0.113 ~ 1 之间波动,波幅比较大,变异系数为 0.31,均值为 0.82。总体来看,夏玉米生育期光温与降水资源季节匹配较好,模拟 47 个生长季中有 18 个生长季光温生产潜力与光温水生产潜力比率为 1,但是,夏玉米生育季降水量较高的相对变率,导致光温水生产潜力非常不稳定。光温水生产潜力是光温水三要素综合效应的结果,而合理有效地利用降水资源是进一步开发光温水资源综合潜力的关键。洛阳地区夏玉米生产的主要制约因素是水分。

3.4 夏玉米潜在水分利用效率模拟分析

表 3 为应用 DSSAT 模型模拟 1961 ~ 2007 年 47a 夏玉米水分平衡分析结果。表中潜在水分利用效率为作物光温水生产潜力与生育期实际耗水量之比,即作物消耗单位水量所形成的潜在经济产量。潜在蒸散量是指在最适宜的土壤水分和肥力条件下,在田间正常生长发育,无病虫害并达到高产水平的特定作物的农田蒸散量,该值为模型根据输入实测气象数据应用彭曼公式计算所得。作物耗水量为在自然条件下,模型输出土壤蒸发量与作物蒸腾量之和。作物需水量指生长在大面积上的,无病虫害危害的作物,土壤水分和肥力条件适

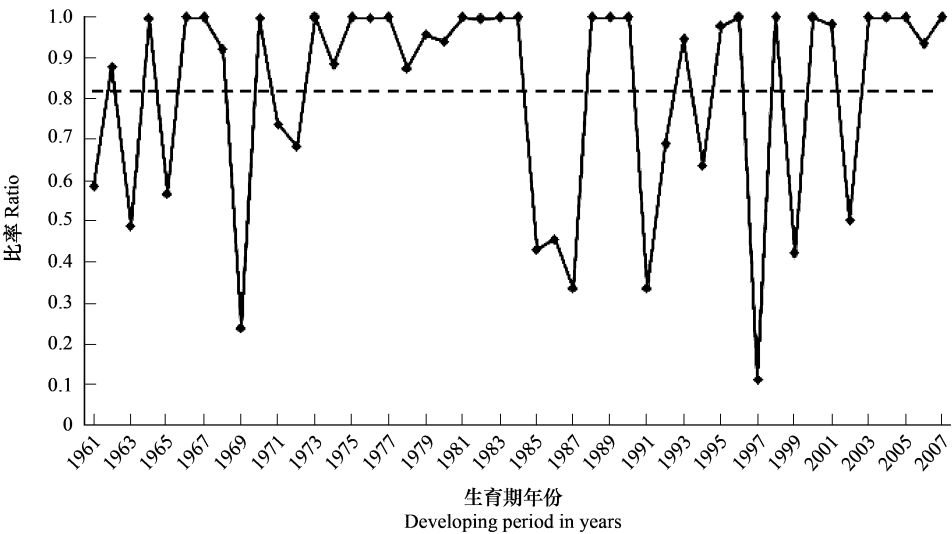


图5 夏玉米典型土壤光温生产潜力与光温水生产潜力比率关系

Fig. 5 The ratio relationship of summer maize photo-temperate productivity and photo-temperate-precipitation productivity on typical soil

宜时,在给定的生长环境中能取得最高潜力的情况下,为满足植物蒸腾、棵间土壤蒸发、组成植株体的水量之和,该值可由 $ET_c = K_c \cdot ET_0$ 计算所得,其中 ET_c 为作物需水量, ET_0 为潜在蒸散量, K_c 为作物系数(根据相关研究^[12],本研究取值为0.99)。水分亏缺量为作物需水量与耗水量之差,水分满足率为作物生育期耗水量与需水量之比,以此对作物水分满足状况作定量评价。

表3 夏玉米多年水分平衡分析

Table 3 Water balance analysis during summer maize development for 47 years

水分平衡参数 Water balance parameter	全生育期 天数 Days of growing season (d)	生育期 降水量 Precipitation in developing period (mm)	水分流失量 Water loss (mm)	潜在蒸散量 Potential evapotra nspiration (mm)	作物耗水量 Crop water consumption (mm)	作物需水量 Crop water requirement (mm)	水分亏缺量 Water surplus and deficiency (mm)	水分满足率 Water content ratio (%)	潜在水分 利用效率 Potential water use efficiency ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
均值 Mean	106.04	356.22	116.06	464.21	328.49	459.56	131.08	71.9	26.424
标差 Standard error of estimate	5.49	125.94	72.77	39.39	44.22	39.00	54.80	10.3	7.059
最小值 Minimum	88	73.00	9.17	358.35	190.00	354.77	67.56	39.0	8.037
最大值 Maximum	116	671.90	358.56	537.44	397.46	532.07	297.65	84.2	37.463
变异系数 The coefficient of variation	0.052	0.354	0.63	0.085	0.135	0.085	0.418	0.144	0.274

潜在水分利用效率为13种土壤类型对应潜在水分利用效率均值 Potential water use efficiency was the mean potential water use efficiency on all soil types

夏玉米生育期多年水分平衡模拟结果表明,生育期内平均降水量为356.22mm,水分流失量为116.096mm,需水量为459.56mm,平均耗水量为328.49mm,水分亏缺量为131.08mm,生育期内平均降水满足率为78.5%,平均水分满足率为71.9%,水分亏缺率为28.12%,平均水分流失率为29.91%,平均潜在水分利用效率为26.424 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。模拟结果表明,洛阳孟津地区夏玉米生育期年际间降水量和水分流失量波动幅度较大,这种不稳定性极大地降低了潜在水分利用效率的稳定发挥。加强农田建设,合理调配水资源,充分发挥夏季光温水的综合利用效率是未来夏玉米生产发展的首要思考的问题。

不同土壤类型夏玉米多年潜在水分利用效率模拟结果表明,不同土壤类型耕地上,夏玉米潜在水分利用

效率基本在 $8.04 \sim 37.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 之间波动。除红黄土质石灰性褐土、洪积潮土和壤质脱潮土外,其它各土壤类型夏玉米平均潜在水分利用效率均在 $25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以上,其中洪积石灰性褐土耕地夏玉米平均潜在水分利用效率最高,均值为 $30.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,波动范围为 $9.90 \sim 38.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

表 4 不同土壤类型夏玉米 47a 潜在水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)

Table 4 Summer maize potential water use efficiency on different soil type for 47 years ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)

土壤类型 Soil types	潜在水分利用效率 Potential water use efficiency			土壤类型 Soil types	潜在水分利用效率 Potential water use efficiency		
	均值 Mean	标差 Standard error of estimate	范围 range		均值 Mean	标差 Standard error of estimate	范围 Range
黄土质褐土 Loess cinnamon soils	28.60	6.54	9.06 ~ 38.02	洪积潮土 Diluvial fluvo-aquic soils	22.28	8.12	4.39 ~ 37.28
红黄土质褐土 Red- loess cinnamon soils	26.43	7.13	9.43 ~ 37.28	覆盖褐土性土 Mantle weakly developed cinnamon soils	29.82	5.84	9.61 ~ 38.02
洪积褐土 Diluvial cinnamon soils	27.71	7.00	7.65 ~ 37.82	壤质潮土 Loam fluvo-aquic soils	25.16	6.98	9.90 ~ 36.90
黄土质石灰性褐土 Loess calcic cinnamon soils	26.27	7.06	8.82 ~ 37.28	废墟潮褐土 Ruins aquic cinnamon soils	25.01	7.44	10.10 ~ 37.28
洪积石灰性褐土 Diluvial calcic cinnamon soils	30.03	5.72	9.90 ~ 38.02	粘质灌淤潮土 Clay cumulated irrigated fluvo-aquic soils	29.70	6.51	7.46 ~ 38.02
洪积潮褐土 Diluvial aquic cinnamon soils	27.71	7.00	7.65 ~ 37.82	壤质脱潮土 Loam demoisted fluvo-aquic soils	24.14	7.48	8.61 ~ 36.02
红黄土质石灰性褐土 Red- loess calcic cinnamon soils	20.66	8.95	1.92 ~ 37.28				

全生育期耗水量模拟结果均值为 328.49mm, 标差为 44.22mm, 范围为 190 ~ 397.46mm The mean of simulated crop water consumption in growing season was 328.49mm, the standard error of estimate was 44.22mm, the range was 190 ~ 397.46mm

表 5 旱作夏玉米光温水生产潜力现实开发状况分析

Table 5 Real developed situation analysis of dry farming summer maize potential photo-temperate-precipitation productivity

年份 Year	旱作历史产量 Real productivity (kg·hm ⁻²)	光温水生产潜力 Potential photo-temperate-precipitation productivity (kg·hm ⁻²)	光温水生产潜力	潜在水分利用效率 Potential water use efficiency (kg·hm ⁻² ·min ⁻¹)	现实水分利用效率 Real water use efficiency (kg·hm ⁻² ·min ⁻¹)
			开发程度		
			Development degree of photo-temperate-precipitation productive potentiality (%)		
1999	3225	6664	48.39	22.63	10.95
2000	4480.5	13894	32.25	37.276	12.021
2001	4639.5	6775	68.48	21.918	15.010
2002	3867	6152	62.86	24.505	15.403
2003	2964	10303	28.77	31.171	8.967
2004	4548	11498	39.55	29.825	11.797
2005	5344.8	10930	48.90	35.662	17.439
2006	4264.5	8330	51.19	28.523	14.602
均值 Mean	4166.66	9318.25	47.55	28.94	13.27
标差 Standard error of estimate	782.67	2771.57	13.83	5.72	2.79
变异系数 The coefficient of variation	0.188	0.297	0.291	0.198	0.210

旱作历史产量数据来源于试验记录数据;光温水生产潜力开发程度为现实产量与光温水生产潜力的比值;潜在水分利用效率为作物光温水生产潜力与生育期实际耗水量之比;现实水分利用效率为现实产量与生育期实际耗水量之比 The dry farming real productivity source experiment data; development degree of photo-temperate-precipitation productive potentiality was the ratio of real productivity and photo-temperate-precipitation productive potentiality; potential water use efficiency was the ratio of photo-temperate-precipitation productive potentiality and precipitation in developing period; real water use efficiency was the ratio of real productivity and precipitation in developing period

4 夏玉米光温水生产潜力开发现状

1999~2006年夏玉米模拟试验生育期内平均降水量为374.95mm,标准偏差为168.20mm,变异系数为0.449,年际间波动较大,从而导致降水满足率不稳定,丰水年最高可达168.8%,欠水年最低可达40.7%。作物平均耗水量为317.74mm,需水量为430.93mm,水分满足率为79.93%。水分流失量模拟结果表明,最近8年夏玉米生育期水分流失量均值为147.65mm,变异系数高达0.731,水分流失率为35.95%,这与当地水土流失的现状吻合,是夏玉米水分满足率偏低,光温水生产潜力不能充分发挥的重要原因之一。

1999~2006年8a内,旱作夏玉米历史产量均值为 $4166.66\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,光温水生产潜力均值为 $9318.25\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。不同年份开发程度差异较大,最高值为68.48%,最低开发度仅为28.77%,平均光温水生产潜力开发度为47.55%。现实水分利用效率为 $13.27\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,仅占潜在水分利用效率的45.87%,光温水生产潜力开发程度较低。

5 结论与讨论

5.1 采用DSSAT模型模拟运算结果表明,洛阳孟津夏玉米47a光温生产潜力均值为 $12039.96\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在 $6900.00\sim 15805.00\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间波动,该值可作为补灌区平均最高产量的上限参考值。不同土壤类型和不同降雨年型光温水生产潜力变化幅度很大,各耕作土壤类型夏玉米多年光温水生产潜力均值为 $8894.42\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,波动范围为 $1529.31\sim 13742.00\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占光温生产潜力的82%左右,该值可作为雨养夏玉米平均最高产量的上限参考值。

5.2 受地形和较大降雨量时空变率影响,洛阳孟津地区夏玉米补灌区与旱作区产量差距明显。夏玉米补灌区产量可达 $10053.0\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,可达到光温生产潜力的84.5%,而旱作区平均产量基本上在 $5000\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右,仅达到光温生产潜力的41.5%,占光温水生产潜力的50%。可见,夏玉米生产潜力开发空间还很大。

5.3 1961~2007年47a模拟分析结果表明,夏玉米平均生育期为106d,生育期内累积太阳辐射量均值为 $1840.03\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}$,积温均值为 $2706.89^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,完全满足其生长发育的需要。而生育期内平均降水量为356.22mm,年际间波动幅度较大,平均水分满足率为71.9%。各土壤类型夏玉米平均潜在水分利用效率为 $26.424\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,波动范围为 $8.04\sim 37.46\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,变异系数较大。研究结果表明,生育期降水量相对不足和较大的波动性极大地影响了夏玉米光温水生产潜力的稳定发挥。

5.4 近8a夏玉米生育期内平均降水量为374.95mm,水分满足率为79.93%,旱作夏玉米历史产量均值为 $4166.66\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,光温水生产潜力均值为 $9318.25\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均光温水生产潜力开发度为47.55%,现实水分利用效率仅占潜在水分利用效率的45.87%。可见,夏玉米的节水潜力很大。

5.5 研究结果表明,生育期降水相对不足、年际间降水波动性大以及水分流失在一定程度上制约了洛阳孟津地区夏玉米生产潜力的开发利用程度,而水分利用效率偏低是夏玉米现实生产力低下的首要原因。不同土壤类型夏玉米生产潜力差异表明,地力状况是影响夏玉米生产的另一首要限制因子。建议今后应重点围绕提高水分利用效率和改善地力状况来开发夏玉米生产潜力。因此,合理安排农时,提高作物生长季与降水时间分布的吻合度,对有效提高水分利用效率是非常关键的一环。而选择耐旱与丰产性能较好的优良品种,是提高作物生产力和挖掘光温水生产潜力的另一关键措施之一。同时增加耕地土壤改良投入、加强农田建设,减少水土流失,改变粗放型的栽培管理技术,培肥土壤,增强水肥耦合度,提高土壤储水蓄水稳定能力等是今后进一步开发夏玉米生产潜力,提高产量的重要途径,也是农业生产可持续发展的长久之计。

5.6 与以往采用公式估算作物生产潜力相比,本研究采用美国引进的DSSAT模型,基于土壤数据库、气象数据库、作物数据库和多年田间试验数据库进行模拟运算,更注重光、温、水、土以及作物生长发育机理等因素的综合作用,更为突出生产潜力形成的主体——作物与其影响因素的响应机制。因此,研究结果更能客观地估算作物光温生产潜力和光温水生产潜力。对于有效揭示影响作物生产潜力的障碍因子及其制约程度,客观而科学地评价旱作农业开发的潜力及前景,指导生产实践、确定适应的开发对策具有非常重要的理论和现实意义。

References:

- [1] Feng Z M. A preliminary study on the study model of the regional land resource carrying capacity-taking Dingxi county of Gansu province as an example. *Journal of Natural Resources*, 1990, 5(3): 271—280.
- [2] Wang S Q, Cheng Y N. Crop yield and weather, climate. Beijing: Science Press, 1991.
- [3] Li K H. Estimation and analysis of crop potential productivity in Henan. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1980, 6—11.
- [4] Leng S L, Han S F. Theory and technology of crops water-saving and high-yield on dryland in northern China. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Publishing House, 1996.
- [5] Tsuji G Y. DSSAT4.0 User's Guide. Vol. 1—4 [z]. The University of Hawaii, 2003.
- [6] Luo Q Y, Lin E D. New advances of the decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT). *Meteorological Monthly*, 1996, 22(12): 10—13.
- [7] Cao Y H. A summary of research on the agricultural decision support system. *Agricultural Meteorology*, 1997, 18(4): 46—50.
- [8] Li J, Shao M A, Fan T L. Databases creation of crop growth model DSSAT3 on the loess plateau region of China. *Agricultural Research In The Arid Areas*, 2001, 19(1): 120—125.
- [9] Yu Q, Saseendran S A, Ma L, Flerchinger G N, Green T R, Ahuja L R. Modeling a wheat-maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM. *Agricultural Systems*, 2006, 89: 457—477.
- [10] Dai M H, Tao H B, Liao S H, Wang L N, Wang P. Estimation and analysis of maize potential productivity based on CERES-Maize model in the North China Plain. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 30—36.
- [11] Lei X B, Zhao B X, Chen R L, Liang X W, Wang X Y, Li L. Research on high-yield cultivation measure of new varieties of maize Luo Yu 2. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2006, 6: 47—49.
- [12] Wu X P. Study on cropping system for water conservation and its assessment in Luoyang city. Postdoctoral Report from Chinese Academy of Agriculture Sciences, 2006.

参考文献:

- [1] 封志明. 区域土地资源承载能力研究模式议——以甘肃省定西县为例. *自然资源学报*, 1990, 5(3): 271~280.
- [2] 王世耆, 程延年. 作物产量与天气气候. 北京: 科学出版社, 1991.
- [3] 李克煌. 河南作物生产潜力的估算和分析. *中国农业气象*, 1980, 6~11.
- [4] 冷石林, 韩仕峰等. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1996.
- [6] 罗群英, 林而达. 农业技术决策支持系统(DSSAT)新进展. *气象*, 1996, 22(12): 10~13.
- [7] 曹永华. 农业决策支持系统研究综述. *中国农业气象*, 1997, 18(4): 46~50.
- [8] 李军, 邵明安, 樊延录, 王立祥. 黄土高原作物生长模型 DSSAT3.0 数据库组建. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(1): 120~125.
- [10] 戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 王利纳, 王璞. 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 30~36.
- [11] 雷晓兵, 赵保献, 陈润玲, 梁晓伟, 王向阳, 李林. 玉米新品种洛玉 2 号高产栽培措施研究. *河南农业科学*, 2006, 6: 47~49.
- [12] 武雪萍. 洛阳节水型种植制度研究与综合评价. 中国农业科学院博士后出站报告, 2006.