

# 洛阳孟津冬小麦生产潜力长周期定量模拟与评价\*

姜志伟<sup>1,2</sup> 武雪萍<sup>1,3\*\*</sup> 华 珞<sup>2</sup> 蔡典雄<sup>1,3</sup> 逢焕成<sup>1</sup>  
吴会军<sup>1</sup> 姜 涛<sup>4</sup> 郑 妍<sup>1</sup> 李银坤<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院 北京 100048;  
3. 农业部旱作节水农业重点开放实验室 北京 100081; 4. 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冬小麦光温生产潜力和光温水生产潜力,并对节水潜力及途径进行了分析。结果表明,洛阳孟津地区 46 年冬小麦光温生产潜力为  $7\ 571\sim 10\ 965\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 平均  $9\ 209\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 此值可作为当地补灌区产量的上限参考值; 光温水生产潜力为  $3\ 957\sim 7\ 450\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 平均  $5\ 510\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 仅占光温生产潜力的 59.8%, 此值可作为雨养冬小麦产量的上限参考值。冬小麦生育期内平均降水量为 226.29 mm, 不及需水量的一半, 平均水分亏缺量占生育期降水量比例高达 72.5%, 平均水分满足率为 66.4%, 生育期水分亏缺成为影响洛阳孟津地区旱作冬小麦生产发展的首要障碍。不同土壤类型及不同降雨年型冬小麦潜在水分利用效率变幅较大, 波动范围为  $12.06\sim 22.94\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ , 46 年均值为  $16.94\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。近 8 年旱作冬小麦现实水分利用效率仅占潜在水分利用效率的 58.5%, 平均光温水生产潜力开发度为 60.5%。结果表明, 洛阳孟津地区冬小麦节水潜力较大, 采用合理的节水农业措施, 加强农田建设, 改善地力, 增强土壤储水蓄水能力, 高效利用降水资源, 提高水分利用效率是今后提高冬小麦产量的重要途径。

**关键词** DSSAT 模型 冬小麦 生产潜力 潜在水分利用效率 现实水分利用效率 开发度 洛阳孟津  
中图分类号: S513; S162.5 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)05-0984-08

## Long-term quantitative simulation and evaluation of potential productivity of winter wheat in Mengjin, Luoyang

JIANG Zhi-Wei<sup>1,2</sup>, WU Xue-Ping<sup>1,3</sup>, HUA Luo<sup>2</sup>, CAI Dian-Xiong<sup>1,3</sup>, PANG Huan-Cheng<sup>1</sup>,  
WU Hui-Jun<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>4</sup>, ZHENG Yan<sup>1</sup>, LI Yin-Kun<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;  
2. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Key Laboratory of Dryland Farming, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 4. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract** DSSAT crop growth model was used to estimate potential productivity of photo-temperature and photo-temperature-precipitation of winter wheat using weather, soil, crop variety and field trial data in Mengjin, Luoyang. Potential productivity development status as well as the developmental measures of winter wheat was analyzed. From the study, the range of photo-temperature productivity of winter wheat is  $7\ 571\sim 10\ 965\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  with a mean of  $9\ 209\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ . This can serve as reference value for maximum yield in irrigated fields. The range of photo-temperature-precipitation productivity is  $3\ 957\sim 7\ 450\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  with a mean of  $5\ 510\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ . This accounts for 59.8% photo-temperature productivity, and can serve as reference value for maximum yield in rainfed fields. The average precipitation is 226.29 mm during the development stage of winter wheat, which is less than half of crop water requirement. Average water deficit is 72.5% of the precipitation at winter wheat development stage with an average

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB109305)、948 国外技术引进与创新研究项目(2006-G52A-03)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA100206, 2006AA100220)、948 引进国际先进农业科学技术重点项目(2006-G56)、国际科技合作项目(2006DFB32180)、国家自然科学基金项目(40571151)、国家财政部土壤有机质提升试点补贴项目(1251610721336)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2008-9, 2009-15)资助

\*\* 通讯作者: 武雪萍(1966-), 女, 汉, 博士, 副研究员, 主要从事土壤与节水农业研究。E-mail: xpwu@caas.ac.cn

姜志伟(1981-), 男, 汉, 硕士研究生, 主要从事生态环境与调控机制研究。E-mail: zhiwei@163.com

收稿日期: 2008-08-14 接受日期: 2008-12-19

water content ratio of 66.4%. This indicates that water deficit during growth is the primary obstacle to winter wheat development in Mengjin. As soil type and annual rainfall are different in the region, potential range of water use efficiency changes significantly—12.06~22.94 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>, with a mean of 16.94 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup> for the soil types and 46-year period. In the past eight years, the actual water use efficiency of winter wheat only accounts for 58.5% potential water use efficiency, while the exploitation degree of potential photo-temperature-precipitation productivity is 60.5%. The study shows that winter wheat has a very high water-saving potential in Mengjin. In order to enhance future winter wheat production, it is quite essential that reasonable agricultural water-saving measures are taken and water use efficiency are augmented by increasing use efficiency of precipitation and improving field conditions that enhances soil water storage capacity.

**Key words** DSSAT model, Winter wheat, Potential productivity, Potential water use efficiency, Actual water use efficiency, Exploitation degree, Mengjin in Luoyang

(Received Aug. 14, 2008; accepted Dec. 19, 2008)

河南省洛阳市孟津地处豫西旱区腹地,属半湿润偏旱区,耕地面积 42.70 万 hm<sup>2</sup>,丘陵旱地占 70% 以上。该地区四季分明,光热充沛,年均温 14.6℃,年均降雨量 646.2 mm,全年无霜期 218 d,总体上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 450~520 mm 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。尤为突出的是,冬小麦全生育期基本处于干旱期,自然气候条件下,水分不足,且年际变化大,导致冬小麦生产潜力年际波动较大,气候单产呈减少趋势。本文从光温和光温水生产潜力的动态变化方面分析该地区影响冬小麦生产发展的主导限制因子,客观地评价旱作冬小麦的潜力及前景,确定适宜的开发对策,以期为该区合理利用自然资源、发展节水农业提供理论依据,同时也为该地区冬小麦生产规划和决策提供新的研究方法和思路。

以前作物生产潜力的研究主要是基于大区域,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遗传特性及气候、土壤、管理措施等因素综合作用的考虑,这大大削弱了对农业生产的指导作用和现实可行性。与以往采用公式估算作物生产潜力不同,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——作物及其对影响因素的响应机制。因此,本研究结果更能客观地估算冬小麦光温和光温水生产潜力,评价当地农业资源利用状况,揭示影响冬小麦生产发展的障碍因子及其制约程度,为当地农业生产和粮食安全起到积极的指导作用。

## 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<sup>[1,2]</sup>。DSSAT 模型是由作物模拟模型支持的决策支持系统,除了数据支持外,还提供计算、解题的方法,并为决策者提供决策结果。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确定栽培管理措施(如施肥、灌水)提供科学决策的依据<sup>[3]</sup>。从 20 世纪 80 年代中期起,IBSNAT 将 DSSAT 向世界 30 多个国家与地区推广应用,又根据反馈的应用结果,对其不断改进和完善,以加速农业技术的推广,为发展中国家合理地利用自然资源提供决策依据和对策。

模型现已发展到 DSSAT4.0 版本(本研究采用 DSSAT4.0.2 版本),可对 26 种作物进行模拟。DSSAT4.0 模型分为数据模块、模型模块、分析模块和工具模块几大部分。作为模型的子模块之一,CERES-小麦模块可建立其独立的作物遗传参数数据、试验管理数据,并通过访问集成于 DSSAT CSM(Cropping System Model)的土壤剖面数据模块、气象数据模块、土壤水分平衡模块、氮和碳平衡模块等进行模拟,预测冬小麦生长、发育和产量形成,而分析模块为冬小麦的灌溉、施肥等管理决策评价提供支持。

## 2 作物生产潜力模拟研究数据库的建立

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。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 气象数据库建立

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,根据该地区的逐日照时数及其相关天文参数,利用  $Q = Q_0(a + bS/S_0)$  经验公式(式中,  $Q_0$  为天文辐射,  $S$  为太阳实测日照时数,  $S_0$  为太阳可照时数,  $a$ 、 $b$  值为大区统一公式<sup>[4]</sup>中的 0.105、0.708)估算了逐日太阳辐射量( $Q$ )。公式计算的孟津太阳辐射量结果与同纬度的郑州气象站点实测结果(中国气象局国家气象信息中心提供)的月平均误差为 11.9%, 公式计算值与实测值吻合度较高。

### 2.2 土壤数据库建立

DSSAT 模型要求输入农田土壤剖面层次的理化性状数据。本研究收集整理了洛阳孟津地区黄土质褐土、洪积潮土、红黄土质褐土、覆盖褐土性土、洪积褐土、壤质潮土、黄土质石灰性褐土、废墟潮褐土、洪积石灰性褐土、粘质灌淤潮土、洪积潮褐土、壤质脱潮土、红黄土质石灰性褐土等 13 种土属 1~100 cm 剖面的 5 个土层(每层 20 cm)的相关数据,主要包括农田坡度(%), 土壤名称和质地, 剖面土层数目、颜色, 各层粘粒含量(%), 粉砂粒含量(%), 砂粒含量(%), >2 mm 石砾含量(%), 各层有机碳含量( $g \cdot kg^{-1}$ ), 养分含量( $g \cdot kg^{-1}$ ), 阳离子交换量 CMC ( $cmol \cdot kg^{-1}$ )及 pH 等。

### 2.3 作物参数调试与数据库建立

应用河南省洛阳农业科学研究所 1992~2006 年旱作“豫麦 48”产量及相应田间管理数据,采用“试错法”<sup>[5]</sup>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“豫麦 48 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。

本文引入归一化均方根差 RMSE(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  $d$ (Index of agreement)和相关系数  $r$  来检验模拟值和实测值的吻合度。

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

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

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,  $RMSE < 10\%$ , 为极好;  $10\% < RMSE < 20\%$ , 为好;  $20\% < RMSE < 30\%$ , 为中等;  $RMSE > 30\%$ , 为差。 $d$  和  $r$  值越接近 1, 说明模拟值和实测值一致性越好, 否则相反。

1992~2006 年“豫麦 48”产量模拟值与实测值对比分析结果表明(图 1),  $RMSE$  为 8%,  $d$  为 0.910,  $r$  为 0.842。说明冬小麦产量模拟结果达到理想水平,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,可用于作物生产潜力模拟研究。

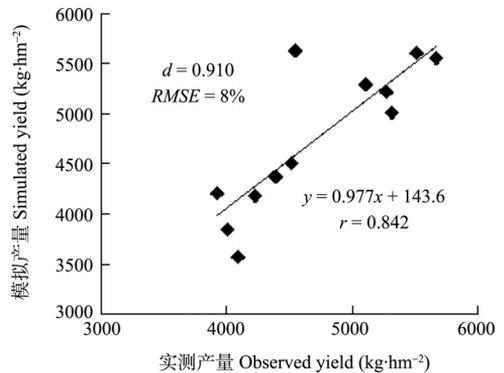


图 1 1992~2006 年“豫麦 48”年产量模拟值与实测值的关系  
Fig. 1 Relationship between observed and simulated yield of “Yumai 48” during 1992~2006

### 3 冬小麦生产潜力的估算结果

利用建立的气象数据库、土壤数据库、作物数据库及多年田间试验数据,应用 DSSAT 模型对冬小麦光温生产潜力和光温水生产潜力进行估算。土壤为洛阳市耕地面积比重较大的典型农作土壤褐土和

表 1 冬小麦“豫麦 48”的作物品种遗传参数  
Tab. 1 Genetic parameters of winter wheat “Yumai 48”

参数 Parameter	PIV	PID	P5	G1	G2	G3	PHINT
均值 Average	25	45	560	23	55	1.8	95
范围 Range <sup>[5,6]</sup>	0~90	0~120	300~800	10~35	20~60	1~2	60~95

PIV: 春化敏感系数 Vernalization sensitivity coefficient; PID: 光周期敏感系数 Photoperiod sensitivity coefficient; P5: 灌浆期特性系数 Thermal time from the onset of linear fill to maturity; G1: 籽粒数特性系数 Kernel number per unit canopy weight at anthesis; G2: 标准籽粒重系数 Standard kernel weight under optimum conditions; G3: 成熟期单株茎穗重系数 Standard, non-stressed dry weight (total, including grain) of a single tiller at maturity; PHINT: 出叶间隔特性参数 Thermal time between the appearance of leaf tips.

潮土。冬小麦模拟生育期为 10 月 1 日~翌年 5 月 31 日, 种植密度为 150 株 · m<sup>-2</sup>, 模拟运行 46 年, 重复 4 次。

### 3.1 光温生产潜力

冬小麦光温生产潜力模拟结果(图 2)表明, 冬小麦光温生产潜力总体相对稳定, 在 7 571~10 965 kg · hm<sup>-2</sup> 间波动, 均值为 9 209 kg · hm<sup>-2</sup>, 标准偏差为 867 kg · hm<sup>-2</sup>, 变异系数为 0.094。生育期累积辐射量变化趋势明显, 波动范围为 2 635.2~3 394.4 MJ · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 均值为 3 065.8 MJ · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 标准偏差为 160.8 MJ · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 对冬小麦光温生产潜力的影响较大。生育期积温变化比较稳定, 波动范围为 1 971~2 479 °C · d, 均值为 2 190 °C · d, 标准偏差为 94 °C · d, 对冬小麦光温生产潜力同样产生重要影响。模拟结果表明, 作物本身的遗传特性、种植密度和生育期天数等对光温生产潜力也有一定的影响。

据洛阳市农业科学院冬小麦高产记录, 补灌区小麦产量可达 7 799 kg · hm<sup>-2</sup>, 达到光温生产潜力的 84.7%。目前洛阳孟津地区的冬小麦多以旱作为主, 平均产量 4 000~5 500 kg · hm<sup>-2</sup>, 仅达光温生产潜力的 43.4%~59.7%。可见, 洛阳孟津地区的光温生产潜力可开发的空間非常大。

生育期太阳辐射量和积温对冬小麦光温生产潜力的影响主要是通过对生物量累积过程的影响来实现。以 2006~2007 年冬小麦生长季为例, 日光温累积生物量(Y<sub>1</sub>)与生育期日累积太阳辐射量(X<sub>1</sub>)和日积温(X<sub>2</sub>)回归分析的复相关系数为 0.98, 拟合方程为 Y<sub>1</sub>=-4 639.5+5.7X<sub>1</sub>+5.4X<sub>2</sub>。太阳辐射量与作物光合作用联系紧密, 太阳辐射量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。此外, 作物本身的遗传特性、种植密度等其他因素对生产潜力也同样产生一定的影响。

### 3.2 光温水生产潜力

为深入研究孟津地区冬小麦光温水生产潜力(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冬小麦光温水生产潜力的模拟结果, 不同土壤类型的光温水生产潜力差异较显著, 说明仅考虑光、温、水对作物影响的条件下, 同一地区具有不同剖面理化性质的土壤对有效地保持水分并将其最大限度地供给作物吸收表现出显著的差异性, 不同土壤类型冬小麦光温水生产潜力的可开发利用潜力不同。

模拟结果表明, 洛阳孟津地区冬小麦光温水生产潜力为 3 957~7 450 kg · hm<sup>-2</sup>, 平均为 5510 kg · hm<sup>-2</sup>。其中, 大于 6 000 kg · hm<sup>-2</sup> 的土壤类型有洪积石灰性褐土、覆盖褐土性土、粘质灌淤潮土, 5 000~6 000 kg · hm<sup>-2</sup> 的有黄土质褐土、洪积褐土、红黄土质褐土、黄土质石灰性褐土、红黄土质石灰性褐土、洪积潮褐土、废墟褐土和洪积潮土, 4 000~5 000 kg · hm<sup>-2</sup> 的为壤质潮土; 3 000~4 000 kg · hm<sup>-2</sup> 的为壤质脱潮土。尽管洪积石灰性褐土、覆盖褐土性土、粘质灌淤潮土所对应的生产潜力较高, 但其占耕作面积比重较小, 对洛阳孟津地区冬小麦开发潜力并不能起主导作用。黄土质褐土、洪积褐土和红黄土质褐土是孟津地区比重最大的土壤类型, 如何开发其潜力对冬小麦生产尤为重要, 其相应的冬

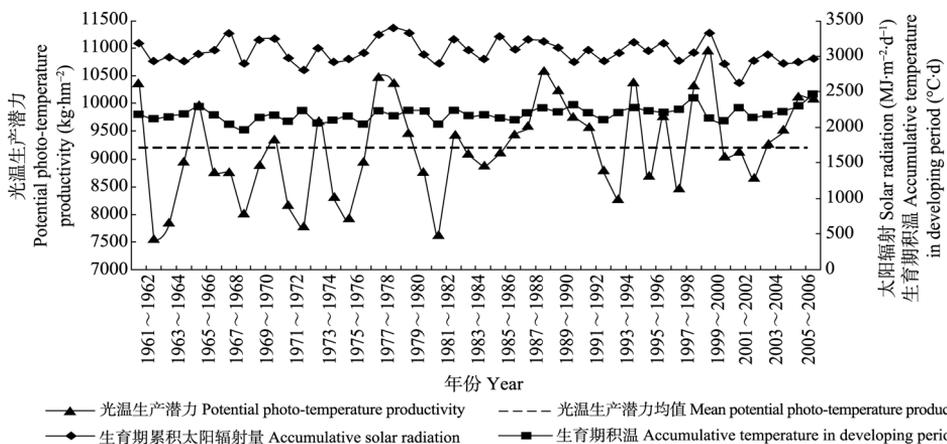


图 2 不同年份冬小麦光温生产潜力及生育期累积太阳辐射量、积温变化  
Fig. 2 Winter wheat potential photo-temperature productivity and accumulative solar radiation, temperature in winter wheat developing period during 1961~2007

表 2 不同土壤类型冬小麦光温水生产潜力模拟结果  
Tab. 2 Winter wheat potential photo-temperature-precipitation productivity in different soil types during 1961~2007  
kg · hm<sup>-2</sup>

土壤类型 Soil type	均值 Mean	标准偏差 Standard error	范围 Range
黄土质褐土 Loess cinnamon soil	5 949	2 269.4	3 165~8 716
洪积褐土 Diluvial cinnamon soil	5 427	2 143.9	2 910~8 065
红黄土质褐土 Red- loess cinnamon soil	5 196	2 104.1	2 773~7 791
黄土质石灰性褐土 Loess calcic cinnamon soil	5 306	2 072.5	2 651~8 625
洪积石灰性褐土 Diluvial calcic cinnamon soil	6 666	2 408.4	3 468~8 556
红黄土质石灰性褐土 Red- loess calcic cinnamon soil	5 306	2 072.5	2 651~8 625
洪积潮褐土 Diluvial aquic cinnamon soil	5 053	2 078.8	2 691~7 562
废墟潮褐土 Ruins aquic cinnamon soil	5 639	2 164.2	3 103~8 393
覆盖褐土性土 Mantle weakly developed cinnamon soil	6 499	2 378.4	3 438~8 326
壤质潮土 Loam fluvo-aquic soil	4 142	1 748.1	2 126~6 074
洪积潮土 Diluvial fluvo-aquic soil	5 035	1 895.7	2 918~8 264
粘质灌淤潮土 Clay cumulated irrigated fluvo-aquic soil	7 450	2 620.2	3 830~8 587
壤质脱潮土 Loam demoisted fluvo-aquic soil	3 957	1 815.7	1 300~6 011
平均 Average	5 510	1 369.2	3 957~7 450

小麦光温水生产潜力均值分别为 5 949 kg · hm<sup>-2</sup>、5 427 kg · hm<sup>-2</sup>、5 196 kg · hm<sup>-2</sup>。因此，占比最大的黄土质褐土光温水生产潜力可反映该地区光温水生产潜力的整体状况。

冬小麦生育期太阳辐射量、气温和降水量对光温水生产潜力的影响主要通过影响生物量累积过程

来体现，如 2006~2007 年日光温水累积生物量(Y<sub>2</sub>)与生育期日累积太阳辐射量(X<sub>1</sub>)、日积温(X<sub>2</sub>)和日降水量(X<sub>3</sub>)回归分析的复相关系数为 0.99，拟合方程为 Y<sub>2</sub>=-511.5+4.4X<sub>1</sub>-0.5X<sub>2</sub>+17.8X<sub>3</sub>。相对于生育期累积太阳辐射量和积温，生育期降水量年间波动较大，对光温水生产潜力的影响更为突出(图 3)。

洛阳孟津地区典型耕作土壤冬小麦光温水生产潜力与生育期降水量年际关系分析结果表明，冬小麦光温水生产潜力年际变化随相应年份生育期内降水量变化而明显波动，相关系数为 0.7，生育期降水量是影响冬小麦光温水生产潜力的 3 个主要气象要素中的主导因素。

### 3.3 光温生产潜力与光温水生产潜力对比分析

冬小麦光温生产潜力与光温水生产潜力比率(图 4)为 0.339~1.000，幅值较大，变异系数为 0.3，均值为 0.598。可见，洛阳孟津地区光温资源丰富，而水分亏缺严重限制了光温生产潜力的发挥，光温资源利用效率较低，水资源短缺是制约当地冬小麦生产的首要问题。

### 3.4 潜在水分利用效率

表 3 为应用 DSSAT 模型模拟 1961~2007 年 46 年冬小麦水分平衡结果。其中，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，其更能确切地表示同一地点、相同作物在不同降水年份的光温水生产潜力，同时可用一个特定年份的潜力值确认其他年份可能实现的潜力，可作为光温水生产潜力的判断指标。潜在蒸散量是指在最适宜的土壤水分和肥力条件下，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

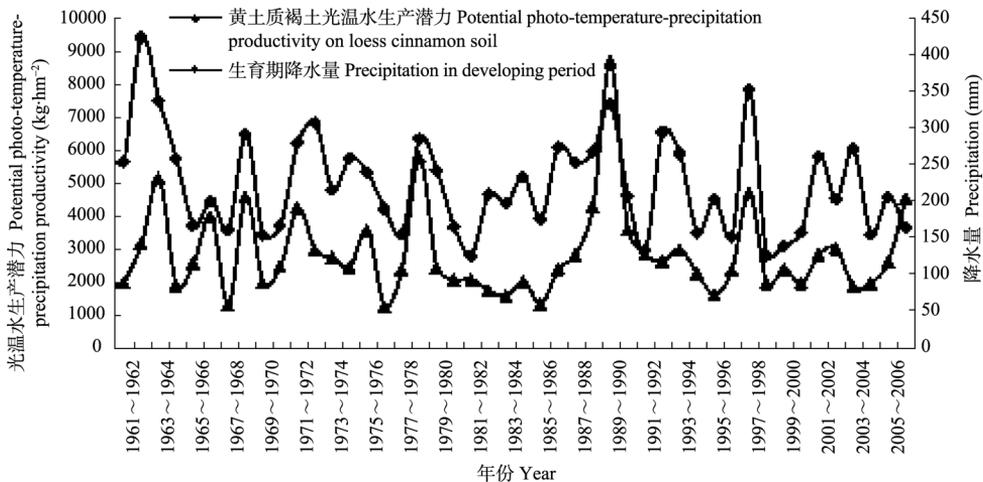


图 3 典型土壤冬小麦光温水生产潜力与生育期降水量关系

Fig. 3 Winter wheat potential photo-temperature-precipitation productivity and precipitation on typical soil

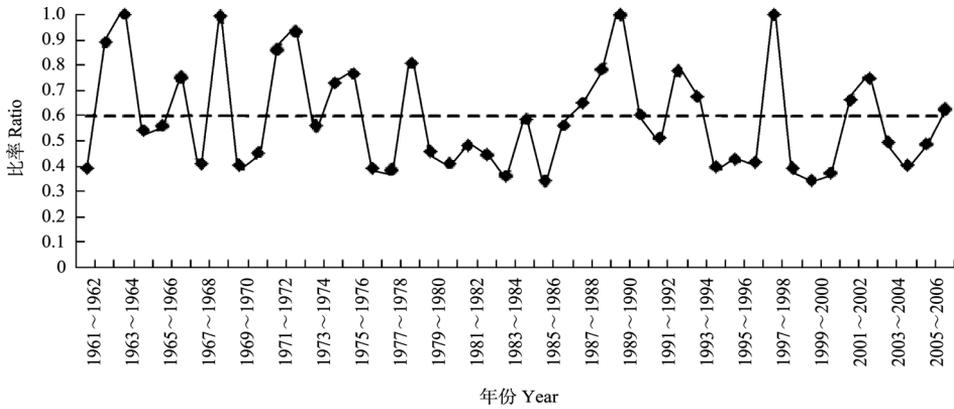


图 4 冬小麦光温生产潜力与光温水生产潜力比率关系

Fig. 4 Ratio of photo-temperature productivity to photo-temperature-precipitation productivity of winter wheat

值为模型根据输入实测气象数据应用彭曼公式计算所得。作物耗水量为自然条件下, 模型输出的土壤蒸发量与作物蒸腾量之和。作物需水量指大面积无病虫害作物在土壤水分和肥力条件适宜时, 能取得最高生产潜力的情况下, 为满足植物生长的蒸腾、棵间土壤蒸发、组成植株体水量之和, 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(取值为 0.85<sup>[7]</sup>)。水分亏缺量为作物需水量与耗水量之差。水分满足率为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。

多年水分平衡模拟结果(表 3)表明, 小麦生育期内降水量为 226.29 mm, 需水量为 480.94 mm, 水分亏缺量为 163.99 mm。生育期内降水量不及需水量的一半, 平均水分亏缺量占生育期降水量高达 72.5%。冬小麦水分满足率均值为 45.4%~95.0%, 潜在水分利用效率为 12.06~22.94  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 不同降雨年份间变异系数较大。模拟结果进一步说明, 洛阳孟津地区旱作农业受水分影响较大, 农业缺水是未来冬小麦生产发展的首要障碍。

1961~2007 年不同土壤类型冬小麦潜在水分利用效率模拟结果(表 4)表明, 不同土壤类型冬小麦潜在水分利用率为 12.06~22.94  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。其中, 潜在水分利用效率不小于 20  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$  的耕作土壤有洪积石灰性褐土、覆盖褐土性土、粘质灌淤潮土。除壤质潮土和壤质脱潮土潜在水分利用效率低于 15  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$  外, 其余各耕作土壤类型均在 15~20  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$  之间。

#### 4 冬小麦光温水生产潜力开发现状分析

对 1998~2006 年冬小麦 8 个模拟生长季水分平衡状况和光温水生产潜力开发状况分析表明, 冬小麦生育期内平均降水量为 190.91 mm, 需水量为 470.16 mm, 水分满足率为 62.0%, 降水满足率为 40.6%, 其中仅有 2 年降水满足率超过 50%, 冬小麦生育期降水量短缺严重制约光温生产潜力的开发。从表 5 可以看出, 该时段内, 旱作冬小麦历史产量均值为 3 769  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 光温水生产潜力均值为 6 542  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 不同年份开发程度差异较大, 最高值为 73.1%, 最低开发度仅为 32.6%, 平均光温水生产潜

表 3 1961~2007 年冬小麦生育期水分平衡分析

Tab. 3 Water balance analysis during winter wheat development period from 1961 to 2007

水分平衡参数 Water balance parameter	全生育期天数 Development period duration (d)	生育期降水 Precipitation in development period (mm)	潜在蒸散量 Potential evapotranspiration (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 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	242	226.29	486.12	316.95	480.94	163.99	66.4	16.94
标差 Standard error	5.90	67.09	623.72	49.75	28.58	66.21	12.6	3.99
最小值 Min.	227	127.70	565.81	239.90	413.20	22.00	45.4	12.06
最大值 Max.	252	425.30	33.62	443.81	530.16	289.01	95.0	22.94
变异系数 Variation coefficient	0.024	0.296	0.06	0.157	0.059	0.404	0.189	0.24

潜在水分利用效率为 13 种土壤类型的平均值 Potential water use efficiency is the mean potential water use efficiency on all soil types.

表 4 1961~2007 年不同土壤类型冬小麦的平均潜在水分利用效率

Tab. 4 Average potential water use efficiency of winter wheat on different soil types form 1961 to 2007  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$

土壤类型 Soil type	潜在水分利用效率 Potential water use efficiency			土壤类型 Soil type	潜在水分利用效率 Potential water use efficiency		
	均值 Mean	标准差 Standard error	范围 Range		均值 Mean	标准差 Standard error	范围 Range
黄土质褐土 Loess cinnamon soils	18.28	4.11	12.73~32.23	洪积潮土 Diluvial fluvo-aquic soils	15.51	3.50	10.02~28.29
红黄土质褐土 Red- loess cinnamon soils	15.94	3.89	10.97~30.16	覆盖褐土性土 Mantle weakly developed cinnamon soils	20.00	4.28	14.33~33.26
洪积褐土 Diluvial cinnamon soils	16.66	3.92	11.46~30.95	壤质潮土 Loam fluvo-aquic soils	12.67	3.30	8.08~24.29
黄土质石灰性褐土 Loess calcic cinnamon soils	16.39	4.35	9.13~28.24	废墟潮褐土 Ruins aquic cinnamon soils	17.33	3.90	12.20~31.20
洪积石灰性褐土 Diluvial calcic cinnamon soils	20.52	4.31	14.46~33.44	粘质灌淤潮土 Clay cumulated irrigated fluvo-aquic soils	22.94	4.60	15.75~35.15
洪积潮褐土 Diluvial aquic cinnamon soils	15.49	3.85	10.54~29.59	壤质脱潮土 Loam demoisted fluvo-aquic soils	12.06	3.53	7.07~24.99
红黄土质石灰性褐土 Red- loess calcic cinnamon soils	16.39	4.35	9.13~28.24	平均 Average	16.49	3.99	12.06~22.94

表 5 1998~2006 年冬小麦光温水生产潜力开发状况分析

Tab. 5 Exploitation situation analysis of winter wheat photo-temperature-precipitation productivity from 1998 to 2006

年份 Year	旱作产量 Real productivity ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	光温水生产潜力 Potential photo-temperature-precipitation productivity ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	光温水生产潜力开发程度 Exploitation degree of potential photo- temperature-precipitation productivity (%)	潜在水分利用效率 Potential water use efficiency ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	现实水分利用效率 Actual water use efficiency ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
1998~1999	3 168	5 953	53.2	22.78	12.13
1999~2000	3 249	4 790	67.8	18.44	12.51
2000~2001	3 523	4 852	72.6	17.72	12.86
2001~2002	2 849	8 737	32.6	27.10	8.84
2002~2003	4 348	9 517	45.7	28.42	12.98
2003~2004	4 371	5 978	73.1	20.39	14.91
2004~2005	4 132	5 691	72.6	21.30	15.47
2005~2006	4 515	6 816	66.2	22.73	15.06
均值 Mean	3 769	6 542	60.5	22.36	13.09
标差 Standard error	646.36	1 734.46	15.07	3.81	2.15
变异系数 Variance coefficient	0.171	0.265	0.249	0.170	0.164

旱作小麦产量数据来源于《洛阳统计年鉴》和《河南统计年鉴》，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。Winter wheat yield data come from 《Statistical Yearbook of Luoyang》 and 《Statistical Yearbook of Henan》. Exploitation degree of potential photo-temperature-precipitation productivity is the ratio of real production to potential photo-temperature-precipitation productivity; Potential water use efficiency is the ratio of potential photo-temperature-precipitation productivity to water consumption during development period; Actual water use efficiency is the ratio of actual productivity to precipitation in development period.

力开发度为 60.5%，现实水分利用效率仅占潜在水分利用效率的 58.5%。连续 8 年的现实水分利用效率均比潜在水分利用效率低，相差 4.9~18.3  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，平均相差 9.3  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。可见，冬小麦节水潜力非常大，采用合理措施将有助于提高光温水生产潜力的开发度，提高水分利用效率。

### 5 结论与讨论

本研究结果表明，洛阳孟津冬小麦 46 年光温生

产潜力为 7 571~10 965  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，平均 9 209  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，此值可作为当地补灌区产量的上限参考值。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，为 3 957~7 450  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，各耕作土壤类型冬小麦多年光温水生产潜力均值为 5 510  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，占光温水生产潜力的 59.8%，该值可作为雨养冬小麦产量上限的参考值。

受地形和降雨量时空变率影响，洛阳孟津地区冬小麦补灌区与旱作区产量差异明显。补灌区冬小麦产量达 7 799  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，占光温生产潜力的

84.7%; 而旱作区平均产量 4 000~5 500 kg · hm<sup>-2</sup>, 仅达光温生产潜力的 43.43%~59.7%。1961~2007 年模拟分析结果表明, 冬小麦生育期内平均降水量为 226.29 mm, 不及需水量的一半, 平均水分亏缺量占生育期降水量比例高达 72.5%, 平均水分满足率为 66.4%, 生育期水分亏缺是影响洛阳孟津地区旱作冬小麦生产发展的首要障碍。各土壤类型冬小麦平均潜在水分利用效率为 16.94 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>, 波动范围为 12.06~22.94 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>, 变异较大。

近8年来冬小麦生育期内平均降水量为 190.91 mm, 水分满足率为 62.0%, 降水满足率为 40.6%。旱作冬小麦历史产量均值为 3 769 kg · hm<sup>-2</sup>, 光温水生产潜力均值为 6 542 kg · hm<sup>-2</sup>, 平均光温水生产潜力开发度为 60.5%, 现实水分利用效率仅占潜在水分利用效率的 58.5%, 节水潜力非常大, 采用合理的节水措施, 高效利用降水资源, 提高水分利用效率是今后提高冬小麦产量的重要途径。

生育期降水不足、年际波动性大及水分利用率低在一定程度上制约了洛阳孟津地区冬小麦生产潜力的开发利用, 而水分利用效率偏低是冬小麦现实生产力低下的首要原因<sup>[8-10]</sup>。不同土壤类型冬小麦生产潜力差异表明, 地力状况是影响冬小麦生产的另一限制因子。建议今后应重点围绕提高水分利用效率和改善地力来开发冬小麦生产潜力。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, 是有效提高水分利用效率的关键环节。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。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冬小麦生产潜力, 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。

## 参考文献

- [1] Tsuji G. Y. DSSAT 4.0 User's Guide[R]. Hawaii: University of Hawaii, 2003
- [2] 罗群英, 林而达. 农业技术转移决策支持系统(DSSAT)新进展[J]. 气象, 1996, 22(12): 10-13
- [3] 曹永华. 农业决策支持系统研究综述[J]. 中国农业气象, 1997, 18(4): 46-50
- [4] 李克煌. 河南太阳总辐射的计算方法和分布特征[J]. 河南师范大学学报, 1980(1): 52-66
- [5] 李军, 邵明安, 樊延录, 等. 黄土高原作物生长模型 DSSAT3.0 数据库组建[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(1): 120-125
- [6] Yu Q., Saseendran S. A., Ma L., et al. Modeling a wheat-maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM [J]. Agricultural Systems, 2006, 89: 457-477
- [7] 武雪萍. 洛阳节水型种植制度研究与综合评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006
- [8] 封志明. 区域土地资源承载力研究模式议——以甘肃省定西县为例[J]. 自然资源学报, 1990, 5(3): 271-280
- [9] 王世著, 程延年. 作物产量与天气气候[M]. 北京: 科学出版社, 1991
- [10] 冷石林, 韩仕峰. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996

## 欢迎订阅 2010 年《麦类作物学报》

《麦类作物学报》是由教育部主管、西北农林科技大学和国家小麦工程技术研究中心联合主办的专业性学术期刊, 也是全国唯一的一份麦类作物专刊。主要刊载麦类作物(小麦、大麦、燕麦、黑麦等)遗传育种、生理生化、栽培管理、食品加工、产品贸易等方面有创见性的学术论文、领先水平的科研成果、学术报告、有新意的文献综述以及学术动态等。读者对象为国内外农业科技人员、农业院校师生及高级农业技术推广和管理人员。

本刊为“农业科学中文核心期刊”、“中国科技核心期刊”、“中国科技精品期刊”, 现已被英国《国际农业与生物技术文摘》数据库(CABI)、美国《化学文摘》数据库(CA)、美国《剑桥科学文摘》数据库(CSA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)数据库、日本《科学技术》数据库(JST)、波兰《哥白尼索引》数据库(IC)、《中国科学引文数据库》(核心库)等国内外多家权威性检索系统收录。影响因子排名已连续 3 年居全国农业期刊前 10 位。

本刊为双月刊, 单月中旬出版, A4 开本, 180 页码。每册定价 20.00 元, 全年 120 元, 国内刊号: CN61-1359/S, 国际刊号: 1009-1041。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号: 52-66。漏订者可直接汇款至编辑部补订。国外总发行: 北京 中国国际图书贸易总公司, 代号: 1479B。

热忱欢迎国内外专家随时指导和赐稿, 亦欢迎有关课题组、单位和个人出版专辑、刊登广告。

联系人: 华千勇 电话: (029)87082642(兼传真)

通讯地址: 陕西杨凌 邠城路 3 号《麦类作物学报》编辑部; 邮政编码: 712100

E-mail: mlzw@chinajournal.net.cn

网 址: http://www.tcrop.net(有在线投稿、在线查询稿件等在线办公系统)