第44卷 第2期 气 象 学 报 Vol. 44, No. 2
1986 年 5 月 ACTA METEOROLOGICA SINICA May, 1986

气候生产潜力的季节分配与玉米的最佳播期*

邓 根 云**

(北京市农林科学院农业综合发展研究所)

提 要

本文将气候生产潜力划分为三个层次,即光能生产潜力、光温生产潜力和光温水生产潜力。应用基于供水量与需水量之比建立的光温水生产潜力,计算了北京地区不同播种期的玉米可能产量,得出明显的峰状曲线,其峰值及其相应的播种期即最佳播期均与栽培试验的结论非常一致,这表明气候生产潜力的理论可为农学中的适宜播期问题建立理论基础。

一、引 言

作物的适宜播种期或最佳播种期是一个极为普遍的问题。早在有文字历史之前,在人类开始有了种植业之后,何时播种便是最先遇到的一个栽培技术问题。在有了文字历史之后,早期的典籍中即已有对适时播种重要性的记载,例如成书于公元前 239 年的《吕氏春秋》的《审时篇》写道:"凡农之道,厚(候)之为宝,……夫稼,为之者人也,生之者地也,养之者天也。……是故得时之稼兴,失时之稼约。茎相若,称之,得时者重,粟之多。量粟相若而舂之,得时者多米。量米相若而食之,得时者忍饥。"当时已完整形成的二十四节气,正是以指导农事季节为中心的天象与物候相结合的历法,是我国古代农业科学的一项辉煌成就。在后魏贾思勰所撰《齐民要术》一书中则已有对各种作物适宜播种期的具体论述,例如"大小麦……八月中戊社前种者为上时,下戊为中时,八月末九月初为下时"。至近代农业科学,各种作物的适宜播期则通过严密设计的分期播种试验来确定。对于适宜播期的实质,已经认识到是由作物的生物学特性及生育进程与气候条件所共同决定。然而,目前这种认识还只停留在一般的定性的分析上,尚无定量的分析方法。本文的目的旨在以玉米的生物学特性的基本规律为基础,探讨应用气候资料直接推算最佳产量播种期的理论和方法,并用以分析京郊旱地玉米的适宜播种期问题。

二、气候生产潜力的概念与分层

作物的气候生产潜力是指栽培条件最佳,作物所需的各种营养能够充分供应,而仅仅

* 本文于 1984 年 5 月 3 日收到,1985 年 3 月 13 日收到修改稿。
** 廖新运(四川省气象科学研究所)、曹静韵参加部分工作。

是气候条件为限制因子时可能达到的产量上限。影响作物生长的农业气候资源主要包括光、温、水、气(CO_2)四种要素，其中 CO_2 的时空变异较小，可暂不论列，其余三项依其可调控的难易程度而可将气候生产潜力划分为以下三个层次：

光能生产潜力[1)]——温度和水分均保持最适状态时，仅由光能资源所决定的生产潜力。

光温生产潜力——水分保持最适时，由光、温共同决定的生产潜力。

光温水生产潜力——由当地的气候条件，即光、温、水的自然状况决定的生产潜力。

光能生产潜力可由下式计算

$$Y_R=\frac{666.7\times10^4}{C\times500}\cdot f\cdot p\cdot Q\cdot\varphi(L) \qquad (1)$$

其中 f 是作物的光能利用率，取已发表过的最高实测值 4.6%[1]，p 是作物的经济系数，Q 是太阳辐射能，单位为[kcal/cm²]，C 是 1 g 有机化合物所贮存的能量，大多数谷物平均取 4.25[kcal/g](或 17.8[kJ/g])，$\varphi(L)$ 为作物光合器官对太阳辐射能的截获率，为作物叶面积系数的函数，从模式化计算简便考虑，可近似地表示为叶面积系数 L 与最大叶面积系数 L_m 之比[2,3]，则(1)改写为

$$Y_R=57\cdot72\cdot Q\cdot\frac{L}{L_m} \qquad (1)b$$

此处 p 取40%。

应用表 1 的叶面积比值和表 2 的旬总辐射资料，算出北京地区不同播种期光能生产潜力于表 3,4 中的第 1 行。可看出光能生产潜力以早播的产量最高，早熟种 4 月中旬播光能生产潜力达 1608.7[斤/亩]，中熟种则可达 2000[斤/亩]，依播期的后延，逐旬降低约 20—60[斤/亩]。早播光能生产潜力高是因为其叶面积高峰期正处于 5 月中旬到 6 月中

表 1　玉米自播种后的各旬 L/L_m 值　　(1982,北京)

品种＼旬	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
京杂 6 号（中熟种）	0	0.01	0.04	0.232	0.645	0.814	0.997	0.947	0.907	0.887	0.856	0.534
京早 7 号（早熟种）	0	0.056	0.192	0.512	0.976	0.992	0.944	0.880	0.464	0.272		

表 2　玉米生长季节逐旬气候资料

项目＼月旬	4月		5月			6月			7月			8月			9月			10月	
	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中
辐射 kcal/cm²	4.56	4.75	5.07	5.37	5.95	5.36	5.50	5.19	4.78	4.75	4.68	4.34	4.35	4.75	4.28	4.11	4.80	3.48	3.07
气温[℃]	13.2	15.6	17.8	19.8	21.4	22.4	24.2	25.5	25.6	26.0	25.9	25.6	24.3	23.4	21.3	19.5	17.2	15.1	12.6
降雨（mm）	8.2	7.3	5.1	7.9	10.0	15.4	18.2	38.8	45.0	61.2	92.3	85.8	68.1	32.8	19.5	13.9	16.4	7.9	5.3

1) 过去一般使用光合生产潜力的术语，作者建议改用光能生产潜力似更为贴切。

旬辐射能最强的时期。

由于环境温度目前还难于调控，因此自然条件下的作物产量难于达到光能生产潜力的水平。考虑了温度作为胁迫因子的光温生产潜力 Y_T 由下式计算

$$Y_T = Y_R \Psi(T) \tag{2}$$

其中 $\Psi(T)$ 为温度影响函数，文献[4-7]给出过几种估算 $\Psi(T)$ 的公式，此处为了简明起见，采用只考虑玉米上下限温度的线性模式，下限温度取 10℃，上限温度取 30℃，即

$$\Psi(T)=\begin{cases} 0 & \text{当} T \leqslant 10℃\text{时} \\ \dfrac{T-10}{20} & \text{当} 10℃ < T < 30℃\text{时} \\ 1 & \text{当} T \geqslant 30℃\text{时} \end{cases}$$

在本文范围内实际计算时，自 4 月中旬至 10 月中旬的旬平均气温均在 10℃至 30℃之间，故温度影响函数只表示为

$$\Psi(T)=\frac{T-10}{20}$$

故光温生产潜力为

$$Y_T = 57.72 \cdot Q \cdot \frac{L}{L_m} \cdot \frac{T-10}{20} \tag{2}a$$

算出不同播种期的光温生产潜力于表 3,4 中的第二行并绘于图 1 。可以看出光温生产潜力与播期的关系与光能生产潜力有明显的不同，呈抛物线形式，其产量最高的播种期中熟种移至 4 月下旬，早熟种则移至 5 月上旬，产量分别为 1449.5[斤/亩]和 1144.7[斤/亩]。

表 3 早熟种(京早7号)不同播期的各级气候生产潜力 (斤/亩)

播期 / 项目	4月		5月			6月			7月	
	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中
光能生产潜力 Y_R	1608.7	1580.6	1539.3	1488.4	1441.4	1406.1	1381.9	1352.3	1320.2	1278.7
光温生产潜力 Y_T	1063.1	1116.4	1144.7	1140.3	1110.0	1061.7	998.0	905.9	796.2	671.1
光温水生产潜力 Y_W	341.7	461.1	623.4	797.5	929.5	996.3	985.0	897.7	780.3	644.2
Y_W/Y_T	0.321	0.413	0.545	0.700	0.837	0.938	0.987	0.991	0.980	0.960

表 4 中熟种(京杂6号)不同播期的各级气候生产潜力 (斤/亩)

播期 / 项目	4月		5月			6月		
	中	下	上	中	下	上	中	下
光能生产潜力 Y_R	2000.6	1945.0	1901.6	1865.4	1804.4	1762.5	1711.3	1642.5
光温生产潜力 Y_T	1447.5	1449.5	1432.1	1378.9	1288.5	1176.4	1040.2	883.0
光温水生产潜力 Y_W	713.3	919.6	1087.8	1190.0	1208.4	1147.0	1015.6	852.1
Y_W/Y_T	0.493	0.634	0.760	0.863	0.938	0.975	0.976	0.965

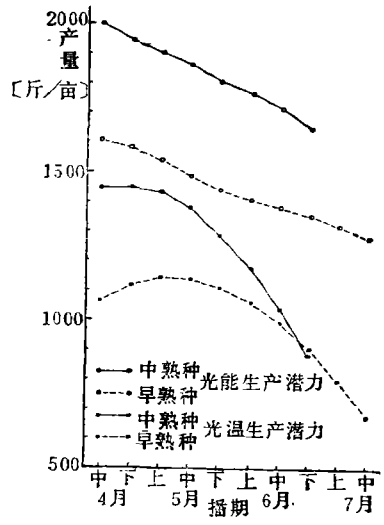


图 1　不同播种期的光能生产潜力与光温生产潜力

三、光温水生产潜力的计算模式

水分是作物生产潜力中最重要的胁迫因子之一，水分的不足或过多是造成作物实际产量远低于可能达到的气候生产潜力的主要原因。同时考虑光温水条件限制的气候生产潜力应该更能反应实际产量水平的地域分布，也应更能反映不同播种期的产量水平的时间变化。

光温水生产潜力可由下式计算

$$Y_W = Y_T \cdot \mu(W) \tag{3}$$

其中 $\mu(W)$为表征水分对产量影响的函数。水分对产量的影响表现为土壤的供水量对作物需水量的满足程度，这可用土壤有效水分含量与田间持水量之比来度量[8]，即 $\mu(W)$表示为

$$\mu(W) = \frac{\mathscr{M} - \mathscr{M}_W}{\mathscr{M}_f - \mathscr{M}_W} \tag{4}$$

其中$\mathscr{M}$为土壤含水量，$\mathscr{M}_W$为萎蔫湿度，$\mathscr{M}_f$为田间持水量，均以一定厚度土层所含水分量的毫米数表示。对于玉米生长期间的水分变化来说，土层厚度范围取 1 m 已能满足精度要求。华北平原有代表性的轻壤土的田间持水量和萎蔫系数(以体积的百分数表示)可分别取 30%和 10%[9]，则 1 m土层的 $\mathscr{M}_f = 300$ mm，$\mathscr{M}_W = 100$ mm。则(3)写成

$$Y_W = Y_T \cdot \frac{\mathscr{M} - 100}{200} \tag{3}a$$

由于缺少农田土壤水分的系统观测资料，上式还不能直接应用。为此提出由降雨和蒸发的气候资料递推求算玉米不同生育阶段的土壤水分的模式。写出土壤水分平衡方程

$$\mathscr{M}_i - \mathscr{M}_{i-1} = R_i - E_{c,i} \tag{4}$$

下标 i 为旬序号，$\mathscr{M}_i$为第 i 旬末的土壤湿度，$\mathscr{M}_{i-1}$为$i-1$ 旬末亦即 i 旬初的土壤湿度，R_i为 i 旬内的降水量，$E_{c,i}$为 i 旬内的蒸发量。农田的蒸发量受蒸发势 E_0和下垫面状况共同制约。在作物生长中期，根系发达，茎叶茂密完全荫蔽地面时，可以认为农田蒸发量即等于蒸发势，而在生长前期或末期，蒸发量均小于蒸发势。考虑到耕作土壤具有一定的阻断水分毛管运动，抑制蒸发的作用，因此可以取播种初期土壤还处于裸露状况时的蒸发量只及蒸发势的一半，则农田蒸发可由以下的模式来表达

$$E_C = E_0 \frac{L_m + L}{2L_m} \tag{5}$$

其中 E_0 为蒸发势，可由彭曼公式[10,11]计算。

将(5)代入(4)改写为

$$\mathscr{M}_i = \mathscr{M}_{i-1} + R_i - E_{0,i} \frac{L_m + L_i}{L_m} \tag{4}a$$

上式只要有土壤泾度$\mathscr{M}$的初始值，则各旬的土壤湿度即可由气候资料和叶面积资料递推

算出。

土壤湿度 $\mathscr{M}$ 的初始值可以如下考虑。北京地区每年12月至翌年3月为土壤冻结期，由于冻结凝聚作用，深层水分上移积聚于冻层，至3月下旬土壤化通时，1米土层内的水分相当充足，可以达到田间持水量的水平，此时田间呈相当潮湿的状态，因此通常形象地称之为返浆期。因此作为多年平均的气候状况，可取3月底的土壤水分含量为田间持水量，以此作为计算各旬土壤含水量的初始条件，即

$$\mathscr{M}_0=\mathscr{M}_f=300\ \text{mm}$$

所以由(4)a即可递推算出各旬的土壤含水量，代入(3)a即可算出各旬的光温水生产潜力列出于表3,4的第3行并绘于图2。图中可看出生产潜力随播期的变化呈峻陡的峰状曲线，且最佳播期与光温生产潜力相比显著后移，中熟种在5月中下旬，产量为1200[斤/亩]上下，早熟种在6月上中旬，产量约为1000[斤/亩]，最佳播期的产量与可播期内的产量可相差2倍到2.5倍。我们近年所作的旱地玉米分期播种试验资料其产量变化趋势与上述光温水生产潜力的分布是一致的，这反映降雨季节分布规律对不同播期玉米产量的强烈制约作用。

四、最佳播期与旱地玉米栽培技术改革

由光温水气候资源决定的气候生产潜力状况和最佳播期的理论计算结果对于北京郊区的玉米生产具有十分重要的指导意义。

京郊的玉米生产大体上分为两大部分。平原为水浇地，种植制度为一年两熟，玉米的种植方式和栽培技术主要由种植制度所决定。两茬平作的夏玉米，播种期必须在6月中旬小麦收获之后，收获期则必须在9月下旬小麦播种之前。两茬套种的玉米，收获期同样必须在小麦播种之前，播种期则由于与小麦共生期不能超过40d的限制，只能在5月上旬末到6月初这段时间范围内。这两种种植方式的玉米生育期都没有多大的调节范围。京郊山区还有约六十万亩的没有水浇条件的旱地玉米，自然降水条件是这部份农田生产的主要限制因子，因此其种植制度为一年一熟制。从热量条件上看，京郊大于10°C的积温超过4000°C，而目前使用的中熟杂交种玉米全生育期只需2700～2800°C，热量条件是有余裕的，可以生长玉米的季节自4月中旬至10月中旬长达190d以上，因此旱地玉米的播种期是有很大的选择余地的。传统的旱地玉米播种期是在4月中旬气温上升超过10°C以后，土壤墒情尚好时抢墒早播。早春抢墒播种常因春旱而不能出全苗，

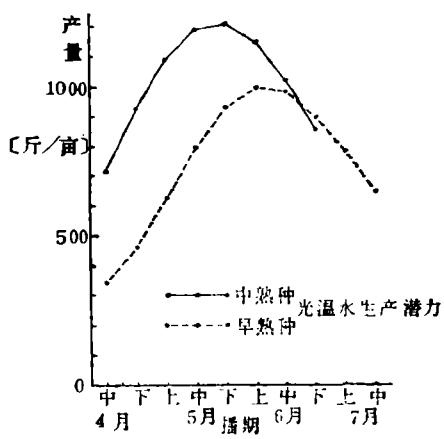


图 2 不同播种期的光温水生产潜力

表 4　玉米分期播种试验产量[斤/亩]　　(1982年本院试验场)

品种 \ 播期		4月	5月			6月			7月	
		25	5	15	25	5	15	25	5	15
中熟种	京杂6号	1080	1180	1256	1206	1014				
	中单2号	862	924	1114	914	572				
早熟种	京单403					894	810	454	380	255
	京早7号					933	718	690	414	332

即便能出苗但至6月中下旬即已达抽雄前的大喇叭口期，是玉米对水分最为敏感的关键期，此期受旱，不能抽雄，产量锐减，称之为“卡脖旱”。而北京的雨季要到7月上中旬才能到来，6月中下旬是干旱最为严重的季节，因此抢墒早播的玉米常遇“卡脖旱”而严重减产甚至绝收，造成过去旱地玉米产量低而不稳。按照上述气候生产潜力的分析和计算结果，玉米的最高产量播种期中熟种是在5月中下旬，早熟种是在6月上中旬，使用中熟种在4月中旬播种其产量只相当于最佳播期的产量的59%，与早熟种在最佳播期时的产量相比亦只占72%。可见传统的种植方法播期选择是不合理的，因此旱地玉米的栽培技术应该进行改革，播期的选择应该使玉米的需水规律和自然降水的分布规律相适应，即推迟到最佳播期范围内播种。但推迟播种以后，由于土壤变干加重，一般不易出苗，这就需要等雨播种。因此旱地玉米栽培技术改革的具体内容归结起来叫做“早熟种等雨晚播”，即准备中熟和早熟种两套种子，以早熟种为主，推迟播期，到最佳播期范围内，遇有一场大于15 mm的降雨过程能够保证拿全苗时，立即抢墒播种。“等雨晚播”并非心存侥幸的冒险策略，而是符合气候规律有充分把握成功的合理措施：1）由于热量资源对于一年一熟制玉米有富余，早熟种玉米的最晚播期可迟至7月中旬初；2)在最佳播期(5月中至6月中)有出苗雨的机率达63.6%，若至7月上旬的可播期之内则机率可超过90%以上。在上述理论指导下，密云县高岭公社的四合村大队和昌平县的流村公社在1981年和1982年严重春旱年，采取等雨晚播的办法均获得大幅度的增产。例如昌平流村公社在1980年旱年未采用等雨晚播办法玉米受旱严重减产，总产比上年减少167万斤。1981年为连旱的第二年，雨量虽比上年稍多，但旱情更为严重。由于采取等雨晚播的办法，等到6月20日降雨33.9 mm以后立即抢播玉米8000亩，结果比上年增产117万斤。1982年继续采取等雨晚播的办法，等到6月12日降雨36.5 mm后抢播1万亩玉米，结果又比上年增产120万斤。现在等雨晚播理论已被京郊群众接受并在生产中迅速推广。

表 5　昌平县流村公社玉米产量

	1979	1980	1981	1982
雨　量(mm)	514.6	364.3	444.6	553.1
总　产(万斤)	384	217	334	454
单　产(斤/亩)	315	178	259	355

本文依据玉米生育进程的基本规律和气候资料，探讨气候生产潜力季节分配的计算模式，由此得出的最佳播期与实际情况非常吻合，并进而提出改革栽培技术的意见，这表

明对于适宜播种期这样一个极为普遍的栽培技术问题，完全有可能从理论上进行定量的推算，这不论对于作物栽培学还是农业气象学都是有意义的。

参 考 文 献

[1] Loomis, R. S., and P.A. Gerakis, Productivity of Agricultural Ecosystems, Photosynthesis and Productivity in Different Environments, 145—172,1975.
[2] Dale, R. F., An Energy-Crop Growth Variable for Identifying Weather Effects upon Maize Yield, Agrometeorology of the Maize (Corn) Crop, WMO(481),240—248,1977.
[3] 邓根云，京郑两种种植方式的光合潜力的初步探讨，自然资源，4,76—84,1981。
[4] 陈明荣，秦岭地区气候的生产潜力，西北大学学报自然科学版，1,111—119,1979。
[5] 邓根云，冯雪华，我国光温资源与气候生产潜力，自然资源,4,11—16,1980。
[6] 王书裕，东北及内蒙东部地区水稻的光温生产潜力，自然资源，4,39—44,1981。
[7] 于沪宁、赵丰收，光热资源和农作物的光热生产潜力——以河北省栾城县为例，气象学报，40，3，327—334，1982。
[8] 陕西省农林科学院主编，土地资源利用讲义(FAO专家组讲授教材)，陕西农林科学院出版，1982。
[9] 山西农学院土壤农化专业编，土壤学，人民教育出版社，1975。
[10] Penman, H. L., Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass, Proc. Roy. Soc. (London), 193, A, 120—145, 1948.
[11] 邓根云，水面蒸发量的一种气候学计算方法，气象学报,37,3,87—96,1979。

THE SEASONAL DISTRIBUTION OF CLIMATIC POTENTIAL PRODUCTIVITY AND THE OPTIMUM SEEDING TIME OF MAIZE

Deng Genyun

(Institute of Comprehensive Development of Agriculture, Beijing Municipal Academy of Agricultural and Forestry Sciences)

Abstract

In this article the potential productivity of climate is divided into three levels: solar radiation, radiation-temperature and radiation-temperature-water. Based on proportion of water supply to water requirement and by using RTW model the author has calculated the possible yield of maize in different seeding time. It is found that the calculated results fit the results of cultivated experiment successfully. It seems to support the idea that the theoretical seeding time in agronomy can be set up by theory of potential productivity of climate.