

旱地玉米等雨晚播技术的农业气候原理

邓根云 聂景芳 史福海 秦金生

(北京市农林科学院农业综合发展研究所, 北京)

摘 要

应用气候生产潜力理论, 定量考虑了光、温、水3种气候要素对玉米生长发育的影响, 组建了利用气候资料计算玉米潜在产量的理论模式, 算出旱地玉米的最佳播种期中熟种在5月中下旬, 早熟种在6月上中旬, 与分期播种试验的结果相一致。论证了等雨晚播技术是符合气候规律的防旱增产有效措施。应用山地气候变化规律, 提出玉米等雨晚播的“海拔—播期—品种搭配”配套技术。

关键词 旱地玉米 最佳播期 等雨晚播 气候生产潜力

前 言

京郊西部和北部山区有旱地玉米约60万亩, 产量低而不稳, 主要原因是雨量偏少且年际变率大, 土层薄保水性能差而极易受旱减产。传统的播种方法是在清明前后, 温度上升到 10°C 以后抢墒早播, 此时蒸发强, 土壤含水量下降迅速, 干土层加厚, 常常造成播后不能出苗或出苗不全。即便出苗以后, 由于雨季一般要到7月份才能到来, 而4月中旬以前播种的玉米到6月下旬即已进入大喇叭口期, 为需水临界期, 极易受卡脖旱而严重减产。所以传统的播种方法常常造成4月抢播, 5月补苗, 6月旱死后重播的结果, 费工费种且产量低而不稳。这说明传统的早春抢墒播种方法不符合农业气候规律, 为此提出了应大幅度推迟播期, 使玉米的需水高峰期与雨季相重合的等雨晚播技术, 并已在实践上获得成功^[1]。本文应用气候生产潜力理论, 建立起计算不同播种期潜在产量的农业气候模式, 结合进行分期播种试验, 推断出旱地玉米的最佳播期, 为等雨晚播技术提供了理论依据, 并应用温度随海拔变化的气候规律提出一套“海拔—播期—品种搭配”技术。

玉米最佳播期的农业气候模型

作物的产量形成过程实质上是作物的绿色器官进行光合作用, 把太阳能转化为有机物质中结合的化学能的过程。光能既是光合作用的动力, 也是叶绿素形成的条件。因此太阳辐射是作物生长和产量形成的基本要素之一。从60年代开始, 各国学者就致力于从生态学角度研究农作物群体或陆地生态系统中太阳辐射能转变为生物量的定量规律, 亦即光能利用率问

注: 聂景芳现在北京市农林科学院情报所工作。参加工作的还有本所刘中丽、王树森同志。

题²。1964年竺可桢指出我国粮食生产受太阳辐射能的制约³。1977年黄秉维进一步提出光合潜力的概念,并用以探讨我国农业生产潜力的地理分布⁴。此后在我国地理学、农学和农业气象学界形成一个比较活跃的关于农业生产潜力的研究领域⁵,为“六五”期间进行农业资源考察、区划和规划工作提供了重要的理论依据。

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(CO₂)四种要素,其中CO₂的时空变化较小,可以暂不讨论,其余3项依其可以人工调控的难易程度而将气候生产潜力相应的划分为以下3个层次:

光能生产潜力 Y_R ——指温度和水分均保持最适状态,仅由太阳辐射能的分布所决定的生产潜力。

光温生产潜力 Y_T ——水分条件保持最适时,由光能和温度条件共同决定的生产潜力。

光温水生产潜力 Y_W ——由光、温、水的自然状况共同决定的生产潜力。

按照上面划分的3个层次的概念,在光能生产潜力意义下,作物的生物产量主要由两方面的因素决定,一方面是作物光合器官截获的太阳辐射能量大小,另一方面则是由植物光合作用量子效率决定的作物的光能利用率的大小。即光能生产潜力可以表示为下式:

$$Y_R = \frac{A}{C} \cdot f \cdot p \cdot Q \cdot \varphi(L) \quad (1)$$

其中 f 是作物的光能利用率; p 是作物的经济系数; Q 是到达地球表面的太阳辐射能,单位为 (Kcal/cm²); $\varphi(L)$ 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; C 是 1g 有机化合物所贮存的化合能,大多数谷物平均为 4.25 (Kcal/g) (或 17.8 (KJ/g)); A 为面积换算系数,即 666.7×10^4 (cm² 亩)。

关于作物的光能利用率问题,国内外不少学者从不同角度进行过理论探讨。Loomis 等得出结果为 5.3%²,黄秉维得出 6.13%⁴。

据国际生物学计划论文集《不同环境下的光合作用和生产力》中汇集的世界各地短期内植物生长最快时推算出的光能利用率来看,最高值为在玉米上测得的 4.6%⁶,我们在建模时即取此值。经济系统 P 取 0.4。光能截获函数 $\varphi(L)$ 可由门司——佐伯公式

$$I_G = I_0 e^{-KL}$$

导出,其中 I_G 为冠层内地面的太阳辐射强度, I_0 为冠层上太阳辐射强度, K 为消光系数, L 为叶面积系数。即

$$\varphi(L) = \frac{I_0 - I_G}{I_0} = 1 - e^{-KL}$$

应用泰勒级数展开得

$$\varphi(L) = 1 - \left(1 - \frac{KL}{1!} + \frac{(KL)^2}{2!} - \dots \right)$$

取一级近似得

$$\varphi(L) = KL$$

假定叶面积系数达到最大值 L_m 时, 光截获函数接近于 1, 则得

$$K = \frac{1}{L_m}$$

于是

$$\varphi(L) = \frac{L}{L_m}$$

(1) 改写为

$$Y_R = 28.86 \frac{L}{L_m} \cdot Q \quad (1)_b$$

Y_R 单位为 (Kg/亩), 实际计算时用分句累计形式

$$Y_R = 28.86 \sum \frac{L_i}{L_m} Q_i \quad (1)_c$$

下表为根据 1982 年玉米播期试验资料算出的播后各旬叶面积系数比 L/L_m 。

表 1 玉米各旬叶面积系数比

旬 序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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
早熟种	0	0.056	0.192	0.512	0.976	0.992	0.944	0.880	0.464	0.272		

光温生产潜力 Y_T 是考虑温度作为胁迫因子的气候生产潜力, 可由光能生产潜力乘以温度影响函数 $\psi(T)$ 计算。于沪宁等根据一些作物的测定数据, 提出过 $\psi(T)$ 的经验公式^[7], 此处为了简明起见, 根据植物生长三基点理论, 我们采用只考虑玉米上下限温度的线性模式, 下限温度取 10°C , 上限温度取 30°C , 即

$$\psi(T) = \begin{cases} 0 & \text{当 } T \leq 10^\circ\text{C} \text{ 时} \\ \frac{T-10}{20} & \text{当 } 10^\circ\text{C} < T < 30^\circ\text{C} \\ 1 & \text{当 } T \geq 30^\circ\text{C} \end{cases}$$

在实际计算的玉米生长季节内气温均在 10°C 至 30°C 范围内, 故温度影响函数只表示为 $\frac{T-10}{20}$,

光温生产潜力写为

$$Y_T = 28.86 \sum \frac{L_i}{L_m} \cdot \frac{T_i - 10}{20} \cdot Q_i \quad (2)$$

光温生产潜力是水分状况保持最适状态下的气候生产潜力，这相当于灌溉地玉米的产量潜力。为了检验模式的效果，应用6—9月的太阳辐射和气温资料，计算出光温生产潜力的累积过程和实测的京杂6号生物产量的增长过程相比较，两者几乎完全重合，表明上述模式的效果是令人满意的。

水分是影响作物生产的最重要的胁迫因子之一，同时考虑光、温、水条件限制的气候生产潜力 Y_W ，可由光温生产潜力 Y_T 乘以水分影响函数 $\mu(M)$ 来计算。

$$Y_W = Y_T \cdot \mu(M) \quad (3)$$

式中 M 为土壤含水量。水分对产量的影响实质上是土壤供水能力对作物需水量的满足程度，可用有效水分含量与田间持水量之比来度量⁸，即

$$\mu(M) = \frac{M - M_W}{M_f - M_W}$$

M_W 为萎蔫湿度， M_f 为田间持水量，以土层所含水分的 mm 数表示。对于玉米生长期内的水分变化来说，1 m 土层可满足精度要求，其相应的对于华北地区有代表性的轻壤土的田间持水量和萎蔫湿度分别为 300 mm 和 100 mm。于是光温水生产潜力写成

$$Y_W = \sum Y_{T,i} \times \frac{M_i - 100}{200} = 28.86 \sum \frac{L_i}{L_m} \cdot \frac{T_i - 10}{20} \cdot \frac{M_i - 100}{200} \cdot Q_i \quad (3)_a$$

上式中 M_i 为各旬的土壤含水量，由土壤水分平衡方程

$$M_i = M_{i-1} + R_i - E_{c,i}$$

应用各旬的降水量和农田蒸散量，自土壤化通时的返浆期开始递推算出⁸。

上述三级气候生产潜力模式用 BASIC 语言编成计算机程序，应用北京地区的气候资料算出不同播期的潜在产量列于表 2。

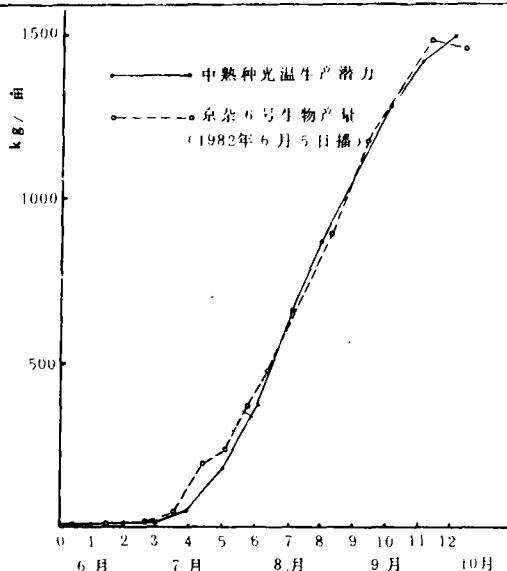


图1 玉米生物产量与光温生产潜力的累积过程

表 2 不同播期的各级气候生产潜力 (kg/亩)

播期		4 月		5 月		6 月		7 月	
		中	下	上	中	下	上	中	下
中熟种	光能生产潜力 Y_R	1000.3	977.5	950.8	932.7	902.2	881.3	855.7	821.3
	光温生产潜力 Y_T	723.8	724.7	716.1	689.5	644.3	588.2	520.1	441.5
	光温水生产潜力 Y_W	356.7	459.8	543.9	595.0	604.2	573.5	507.8	426.1
早熟种	光能生产潜力 Y_R	804.4	790.3	769.7	744.2	720.7	703.1	690.9	676.2
	光温生产潜力 Y_T	531.6	558.2	572.4	570.2	555.0	530.9	499.0	452.9
	光温水生产潜力 Y_W	175.9	230.6	311.7	398.8	464.8	498.2	492.5	448.9

从表2可以看出不同播种期的气候生产潜力有以下几个特点:

(1) 光能生产潜力大于光温生产潜力, 而光温生产潜力又大于光温水生产潜力。

(2) 光能生产潜力随播期的推迟而下降。4月中旬播种的潜在产量最高, 早熟种可达800 ($\text{Kg}/\text{亩}$), 中熟种可达1000 ($\text{Kg}/\text{亩}$)。早播的光能生产潜力高是因为玉米的叶面积高峰期正处在5月中旬太阳辐射能最强的时期。

(3) 不同播期的光温生产潜力呈抛物线, 潜在产量最高的播种期中熟种为4月下旬, 产量达725 ($\text{Kg}/\text{亩}$), 早熟种为5月上旬, 产量为572 ($\text{Kg}/\text{亩}$)。

(4) 光温水生产潜力呈陡峭的峰状曲线, 产量最高的播种期, 中熟种在5月中下旬, 产量可达600 ($\text{Kg}/\text{亩}$), 早熟种在6月上中旬, 产量可达500 ($\text{Kg}/\text{亩}$)。Yw是同时考虑了温度和水分胁迫的生产潜力, 因此它反映的是旱地玉米的情况。表3是旱地玉米分期播种试验的结果, 可以看出, 这与上述Yw模型推断的最佳播期的趋势完全一致, 这对于分析山区玉米生产与气候的关系以及采取防旱措施有指导意义。

表3 旱地玉米播期试验产量 ($\text{Kg}/\text{亩}$) (1982年)

播 期	4 月		5 月			6 月				7 月		
	25	5	10	15	25	5	10	15	25	5	10	15
京 杂 6 号	540	590		628	603	507						
京 早 7 号						466.5		359	345	207		166
黄 417	418.5		438.3		446.4		485.2		419.9			
京 早 8 号			319.2		347.7		359.8		337.3		252.1	

注: 表中黄417、京早8号为1985年试验资料。

等雨晚播的气候保证率与增产效果

上述气候生产潜力模式推算的最佳播期是依据多年平均气候资料, 即等于50%保证率的情况。图2是不同保证率的播期—产量曲线; 可见保证率越高, 最佳播期越晚。在实际生产中采用80%保证率是稳妥而积极的, 这种情况下早熟种的最佳播期在6月中旬, 中熟种则在6月上旬。

推迟播期能否成功的重要条件是在最佳播期内能否有保证出苗的降雨过程。应用自1915年以来的逐日降雨资料, 统计春夏播期间大于15毫米的出苗雨机率, 得出在5月中旬至6月中旬最佳播种期范围内的机率可达63.6%, 在5月中旬到7月上旬适播期内的机率则可达86.4%, 而在偏早期有出苗雨而适播期内无出苗雨的机率则只有3%。可见采用等雨晚播的办法既能保证出苗, 又能躲过卡脖旱, 是适应北京地区气候特点有效的防旱增产措施。

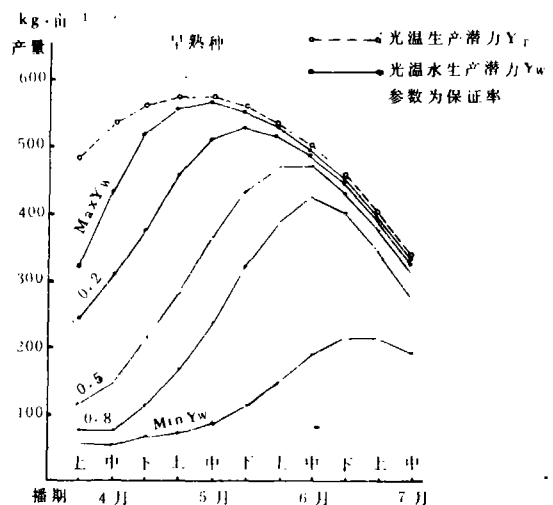


图2 不同保证率的播期与产量曲线

为了比较论证等雨晚播措施在玉米防旱增产中的作用, 1984 和 1985 年在门头沟区永定乡和密云县新城子乡进行了 3 因素的正交试验, 所选三因素为: ①品种(中熟种、早熟种); ②播种期(早播、等雨晚播); ③播种方法(平垅、按田)。试验目的是明确那一种因素对产量影响最大, 以及 3 因素的最佳组合。2 年的试验结果都很一致, 表 4 列出最具代表性的结果。由表中可看出播期对产量的极差最大, 达 174.5 (Kg/亩), 是影响产量的主导因素, 而以 6 月 20 日等雨晚播的产量最高, 而 3 因素的最佳组合则为晚播×(中熟种×平垅)。

表 4 $L_3(2^7)$ 正交试验因素分析表 (1984, 门头沟永定)

处 理	品 种	播 期	方 法	品种×播期	品种×方法	播期×方法	产 量 (Kg/亩)
1	1	1	1	1	1	1	295.0
2	1	1	2	1	2	2	123.1
3	1	2	1	2	1	2	409.1
4	1	2	2	2	2	1	347.9
5	2	1	1	2	2	1	190.0
6	2	1	2	2	1	2	248.8
7	2	2	1	1	2	2	369.8
8	2	2	2	1	1	1	338.0
K_1	271.3	191.7	293.5	259.0	300.2	270	
K_2	286.7	366.2	264.5	298.9	257.7	287.7	
$K_1 - K_2$	-15.4	-174.5	29.0	-39.9	42.5	-17.7	

注: 品种 1 是中熟种, 品种 2 是早熟种; 播期 1 是 5 月 9 日, 播期 2 是 6 月 20 日; 方法 1 是平垅, 方法 2 是按田。

不同海拔推迟播期的品种使用问题

采用等雨晚播措施, 另一个重要问题是保证后期正常成熟。京郊山区海拔高差很大, 热量条件显著不同, 等雨晚播须依不同海拔和实际播期合理使用品种, 才能保证正常成熟获得高产。从分期播种试验资料来看, 早播所需的积温偏高, 中熟种可达 2900—3000 (°C·日), 早熟种达 2500—2600 (°C·日), 但适期播种或偏晚播种的所需积温较少, 中熟种只需 2500—2800 (°C·日), 早熟种只需 2200—2400 (°C·日) (见表 5)。应用北京市农业气候资源考察和区划所取得的资料, 得出不同海拔的大于 10 °C 的初终日 and 积温列于表 6。可以看出, 直到海拔 600 m 以上, 活动积温仍有 3200 (°C·日), 对于一年一熟的玉米仍有相当富余。算出不同海拔推迟播期以后至 10 °C 终日的剩余积温列于表 7, 配合表 5 所列各品种所需的积温值, 便可推算出不同海拔高度推迟播期后应该选用的适宜品种 (表 8)。

表 5 玉米全生育期所需活动积温

品 种	积温范围 (°C · 日)
中熟种 京杂 6 号、京白 10 号	2700 — 2800
中单 2 号	2600 — 2700
早中熟种 京单 403 、黄 417	2400 — 2500
早熟种 京早 7 号	2300 — 2400
京早 8 号	2200 — 2300

表 6 不同海拔 > 10 °C 的初终日与积温 (°C)

海拔 (m)	初 日	终 日	间隔天数	积 温
100	4 / 8	10 / 25	200	4070
200	4 / 10	10 / 22	195	3900
300	4 / 11	10 / 19	191	3720
400	4 / 13	10 / 16	186	3550
500	4 / 15	10 / 13	181	3380
600	4 / 16	10 / 10	177	3200

表 7 不同播期 (月/日) 后的剩余积温 (°C)

海拔 (m)	5 / 10	5 / 20	5 / 30	6 / 10	6 / 20	6 / 30
100	3580	3370	3150	2920	2690	2470
200	3440	3240	3020	2790	2570	2350
300	3280	3080	2860	2630	2410	2190
400	3150	2950	2740	2500	2290	2050
500	3010	2820	2610	2370	2160	1930
600	2850	2660	2450	2210	2000	

表 8 山区等雨晚播各品种适宜播期

海拔 (m)	京杂 6 号	黄 417	京早 7 号	京早 8 号
100	5 月中—6 月上	5 月下—6 月中	5 月下—7 月上	6 月上—7 月上
200	5 月中—5 月下	5 月下—6 月中	5 月下—6 月下	6 月上—7 月上
300	5 月中—5 月下	5 月中—6 月上	5 月下—6 月下	6 月上—6 月下
400	5 月上—5 月中	5 月中—6 月上	5 月下—6 月中	6 月上—6 月中
500	5 月上—5 月中	5 月中—5 月下	5 月中—6 月上	6 月上—6 月中
600	5 月上	5 月上—5 月中	5 月中—6 月上	5 月下—6 月上

参 考 文 献

- 1) 钱啸风：利用中早熟玉米品种等雨抢种夺丰收，《北方旱区农业学术讨论会论文》，1984
- 2) Loomis, R. S. et al: Maximum crop productivity: an estimate, Crop Sci. (3) 1963: 67 — 72
- 3) 竺可桢：论我国气候特点及其与粮食生产的关系。《地理学报》，30 (1) 1964。
- 4) 黄秉维：《自然条件与作物生产—光合潜力，农业现代化概念》，中国农林科学院出版，1977 年。
- 5) 邓根云等：我国光温资源与气候生产潜力，《自然资源》，(4) 1980。
- 6) Loomis, R. S. et al: Productivity of Agricultural Ecosystems. IBP3, Photosynthesis and Productivity in Different Environments, Cam. Univ. Press, 1975
- 7) 于沪宁等：光热资源与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) 1982: 327 — 334
- 8) Doorenbos, J. et al: Yield Response to Water, FAO Irrigation and Drainage Papers, 1979, 33
- 9) 邓根云：气候生产潜力的季节分配与玉米的最佳播期，《气象学报》，44 (2), 1986: 192 — 198

Agroclimatic Principles for the Technique of Postponing Seeding Date of Rainfed Maize While Waiting for Rain

Deng Genyun, Nie Jingfang, Shi Fuhai, Qin Jinsheng

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

Abstract

Using the theory of climatic potential productivity, and evaluating the quantitative influence of solar radiation, temperature and water on the growth of maize, a set of models for estimating the potential yields of maize on the basis of climatic data was established. The calculated optimum seeding date, for the medium variety, is the last 20 days of May, and for the early variety, is the first 20 days of June. It fits the results of field tests quite well. It is also identified that the technique of postponing seeding date while waiting for rain conforms to the pattern of climate, and is an effective way to avoid drought and increase yield. In accordance with the pattern of climate in the mountainous region, a complete set of the "elevation-seeding date-variety" technique was established.

Key words: Rainfed maize (corn); Optimum seeding date; Postponing seeding date; While waiting for rain; Climatic potential productivity