

玉米潜在产量与积温关系模型及其应用¹⁾

邓根云 刘中丽

(北京市气象局农业气象中心 100081)

提 要

依据干物质积累的基本规律,用包括早、中、晚熟和紧凑、平展两类株型的10个玉米杂交种在北京、延庆、泰安、公主岭、石河子5个不同气候类型地区的试验观察数据,模拟出玉米的标准生长函数 $W = [1 + e^{8.56 - 13.52t}]^{-1}$ 。据此建立潜在生物量与品种所需积温的关系: $B_{max}/kg \cdot \text{亩}^{-1} = 100 + 1.11 \sum T_m$ 。用此模式估算了不同熟性品种的潜在产量,讨论了模拟结果在气候变化影响评价中的应用。

关键词: 气候变化 潜在产量 积温

前言

大气温室效应导致气候变暖是各国政府和学术界共同关心的当代重大环境问题之一。评价气候变化对农业影响的主要方法是建立作物-气候模式⁽¹⁾。作物-气候模式一般分为统计模式和模拟模式两大类,由于问题的复杂性,模拟模式尚未达到实用化水平,目前主要采用统计模式⁽²⁾。统计模式的建模方法一般是将长序列的产量资料进行低通滤波,把分离出的高频项看作气候产量,与所选取的气象因子建立多元回归方程。而趋势项或低频项则认为这是由于社会经济条件变化、农业生产条件改善的结果。作物品种及其组合(种植制度)是农业生产系统中合理利用气候资源的两项主要功能,特别是品种的熟性育种,更是直接为适应热量条件而采取的主动措施,因此在气候变暖的农业评价中应该占有重要地位。然而,由于良种的推广是一个逐渐普及的过程,其产量效应与其它农业技术进步融合在一起,表现

为趋势产量而无法加以分离,因此在一般的“作物-气候”的统计建模中,品种的作用是被忽视的。因此,研究不同熟性玉米品种的潜在产量与热量条件的定量关系,具有理论和实践的双重重要意义。

1. 干物质积累过程的基本规律

农作物的产量形成,实质上是光合产物的累积过程。作物群体的生物量增长过程由于自身的生命历程,“库”“源”关系及营养空间的制约,存在一种负的反馈机制,和自然界的各种生物种群消长规律一样,可用Verhulst-Pear方程来描述^(3, 4)

$$\frac{dy}{dt} = k_0 y (y_m - y) \quad (1)$$

其中 y 表示生物量, y_m 表示最终达到的最大生物量, k_0 为比例系数。上式解即为logistic生长函数

$$y = y_m / (1 + e^{\alpha - \beta t}) \quad (2)$$

其中 α 、 β 是与自变量 t 的选择有关的两个参数。文献^[5]曾用式(2)拟合过丹玉13和沈单7号两个玉米杂交种的生长函数,由于 t

1) 国家自然科学基金资助项目。

是以播后的天数作为自变量，两个品种拟合出的 α 、 β 值相差很大，表明式(2)的logistic函数只能反映某一具体品种的生长曲线，不能概括不同熟性品种生长过程的共同特性。农业气象学的理论和实践表明，以积温作为衡量作物生育进程的时间标尺比用天数更具代表性。将式(2)中的自变量用积温 ΣT 代替，改写成

$$y/y_m = [1 + e^{-\beta \Sigma T}]^{-1}$$

作归一化处理，即引入新的变量 $W = y/y_m$ 和 $u = \Sigma T / \Sigma T_m$ ，其中 ΣT_m 表示品种全生育期所需的总积温，故 u 可称为相对热单位，于是上式可写成

$$W = [1 + e^{-b u}]^{-1} \quad (3)$$

此为我们导出的用于根据各种熟性玉米生物量增长过程的生长函数普遍形式。

表1是用11组干重增长数据由式(3)拟合的玉米生长曲线。表中的资料包括早、中、晚3种熟性类型，其中包括平展型和紧凑型(掖单号系列品种)两类株型，而且试验是在北京市郊、延庆、山东泰安、吉林公主岭、新疆石河子5个气候条件不同的地区进行的，各组数据拟合出的 a 、 b 值差异不大，而全部数据在一起拟合的相关系数高达0.967，因此，总体拟合出的生长函数

$$W = [1 + e^{8.56 - 13.52 u}]^{-1} \quad (4)$$

具有普遍的代表性，可称之为玉米的标准生长曲线。

表1 玉米生长曲线模拟

熟性	品种名	地点	年份、播期	a	b	r	n
早	鲁原单4号	泰安	1979.6.22	8.45	13.48	0.979	10
	京早7号	北京	1983.6.7	9.26	14.63	0.980	7
中	京杂6号	北京	1982.6.5	8.45	13.08	0.973	10
	京杂6号	北京	1983.5.15	7.88	13.50	0.963	7
	掖单52	北京	1991.6.21	8.69	13.20	0.951	6
	掖单4号	北京	1991.6.21	8.93	13.40	0.949	6
晚	吉单101	公主岭	1984.5.5	8.44	14.46	0.985	5
	维尔156	石河子	1982.4.23	8.86	13.53	0.968	9
	南矮1号	石河子	1982.4.23	8.88	14.20	0.969	9
	掖单13	延庆	1991.4.28	8.47	13.15	0.976	8
	沈单7号	延庆	1991.4.28	8.82	13.48	0.979	8
全 部				8.56	13.52	0.967	84

2. 潜在生物量和潜在产量与积温关系

先研究潜在生物量的估算问题。对式

(3) 求导数得到

$$\frac{dw}{bu} = \frac{be^{-bu}}{(1 + e^{-bu})^2} \quad (5)$$

dw/du 的意义是生物量的增长率。生物量的最大增长率即 dw/du 的极大值可由

$$\frac{d^2w}{du^2} = \frac{b^2 e^{-bu} (e^{-bu} - 1)}{(1 + e^{-bu})^3} = 0 \quad (6)$$

得出。由上式可知当 $a - bu = 0$ 时， $d^2w/du^2 = 0$ ，所以 dw/du 的极大值为 $b/4$ 。

de Wit(8)曾研究过各种作物的生物量积累过程的资料后提出作物的“潜在生产率”(potential production rate)的概念，并定义为“在一般天气条件下，在没有病虫杂草为害的环境里，当水分和养分供应最佳时，覆盖地面的作物层的生长速率”，并指出：尽管作物叶片的最大净同化率差别很大，但 c_3 类或 c_4 类的种间与种内的潜在生产率差别很小，而 c_3 与 c_4 类之间有区别。我们由玉米标准生长曲线推导出最大干物重增长率等于 $b/4$ 的结果也证实了de Wit的推断。

由此得出无量纲的潜在生产率 $PPR = b/4 = 3.38$ 。按

$$PPR_T = \frac{dy}{d\Sigma T} = \frac{y_m}{\Sigma T} \frac{dw}{du}$$

由表中资料算出 $y_m/\Sigma T$ 的极大值为 0.566，得出

$$PPR_T = 1.91 \text{ kg/亩} \cdot \text{C}$$

以玉米生长季的平均温度为 19.5°C 代入得出

$$PPR_D = 37.3 \text{ kg/亩} \cdot \text{日}$$

如以太阳辐射为 $2.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{日}^{-1}$ 计，上述潜在生产率相当于光能利用率为 4.76%。按光合作用量子效率为 28% 计，理想的光能作用率可达 8.3%，在人工控制的水培条件下曾观察到玉米光能利用率达 6.45% (9)，但田间实测的光能利用率最高值为 4.6% (10)，我们根据玉米标准生长曲线推算出的光能利用率略高于此值，表明上述潜在生产率数值是比较可靠的。

作物的潜在总生物量，是指在潜在生产率条件下，所能获得的最大干物质产量。de Wit (8) 曾指出，不同品种的总生物量的大小主要由品种的生育期长短决定。因此，可以在一定的假设条件下，用上述潜在生产率数值，组建估算品种的潜在总生物量的模型。将全生育期分为 3 个阶段：第一阶段为

叶层建成期，假定相对热单位 $u = 1/4$ ，此时生物量可达 $100 \text{ kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ ，叶面积指数可达 1；第二阶段为旺盛生长阶段，相对热单位占 1/2，生产率达到并维持在潜在生产率的水平；最后一个阶段相当于灌浆成熟阶段，相对热单位占 1/4，生产率下降到潜在生产率的 1/3 的水平。由此得玉米的潜在总生物量 B_{\max} 与总积温 ΣT_m 的关系

$$B_{\max} = 100 + PPR_T \cdot \frac{\Sigma T_m}{2} + \left(\frac{1}{3} PPR_T\right) \cdot \left(\frac{1}{4} \Sigma T_m\right) = 100 + 1.11 \Sigma T_m \quad (7)$$

其单位为 $\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ 。上式表明，不同熟性的玉米品种，积温相差 $100 \text{ C} \cdot \text{日}$ ，总生物量可相差 $111 \text{ kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ 。

潜在产量的估算牵涉到光合产物的分配或“源”与“库”之间的相互制约关系，因而复杂得多。但最少有一点可以肯定，即生育期长，总生物量高的，经济系数也越高。Tollenaar (9) 探讨玉米的产量上限时，提出潜在产量增加 $200 \text{ kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ ，经济系数提高 0.01。假定最高产量的经济系数不超过 0.55，由式 (7) 可以计算出不同积温品种的潜在生物量与潜在产量 (见表 2)。由表 2 看

表 2 潜在生物量、潜在产量与积温的关系

积温/ $\text{C} \cdot \text{日}$	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3100	3200	3300	3400
潜在生物量/ $\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$	2764	2875	2986	3097	3208	3319	3430	3541	3652	3763	3874
经济系数	0.52	0.52	0.523	0.527	0.53	0.533	0.537	0.540	0.543	0.547	0.55
潜在产量/ $\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$	1437	1495	1562	1630	1700	1770	1841	1912	1984	2058	2131

表 3 中、美、加玉米高产纪录比较

高产纪录/ $\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$	品种名	熟性	灌溉条件	创造者	地点	年份	播期	收获期	生长季积温
1548.4 (11)	FS854	特晚	无灌溉	Warsaw	美·伊利诺	1935	4月25日	10月17日	3420 $\text{C} \cdot \text{日}$
1455.1*	拔草13	晚	灌溉	王占桂	北京怀柔	1991	4月27日	9月26日	3050 $\text{C} \cdot \text{日}$
1226.1**	先锋3540	早	灌溉	Stevenson	加·安大略	1985			2700 $\text{C} \cdot \text{日}$
1150.8**	先锋3540	早	无灌溉	Stevenson	同上	1985			2700 $\text{C} \cdot \text{日}$

* 北京农科院陈国孚、孙政才验收报告。地块为 1 亩左右的窄长条梯田，边行效应较大。

** Better Crops/Spring 1986, 9

出, 需积温在 $2500^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以下的早熟种玉米, 潜在产量约 $1400\text{--}1500\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$, 需积温在 $2600\text{--}2800^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 的中熟种玉米, 潜在产量约 $1600\text{--}1700\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$, 需积温 $2900\text{--}3000^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 的晚熟种玉米, 潜在产量可达 $1800\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$ 左右, 需积温超过 $3200^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以上的特晚熟种, 潜在产量可达 $2000\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$ 以上。Tollenaar^[9]曾从最大干物质累积速度资料和光能利用率两个角度探讨玉米产量上限, 结论认为美国玉米带的产量上限可达 $2092.4\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$, 这与我们估算的需积温达 $3300^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以上的特晚熟种的潜在产量相当。比照我们的计算结果, Tollenaar提出的玉米产量上限只代表美国玉米带中、南部地区可种特晚熟种的水平。表3是中、美、加的玉米高产纪录, 其中美国伊利诺州农民华索(Warsaw, 位于Bloomington以东, 40°N 附近)创造的玉米高产世界纪录 $1548.4\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$, 所使用的品种即是生育期长达170天, 积温超过 $3400^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 的特晚熟种。加拿大的安大略省位于玉米带的北部, 生长季积温只有 $2700^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 左右, 只能用需积温较少的早熟种, 其高产纪录只达到 $1226.1\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$, 比玉米带中部的高产纪录低 $320\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$ 以上, 充分显示品种熟性与产量潜力之间的密切关系。

3. 潜在产量-积温模式在气候影响评价中的可能应用

玉米是谷类作物中对热量条件要求变幅最宽的作物, 其特晚熟种与早熟种之间所需积温可以相差 $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以上, 潜在产量则可差 $700\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$ 。玉米对热量资源有很宽的气候适应性的特点与其由野生祖先大刍草进化到现代玉米, 雌穗与雄穗分离而形成非固定生长点(indeterminate growing point)的特性有密切关系。玉米在抽雄以后生长点由茎尖转向由腋芽发育的雌穗, 在后期条件适宜、养分供应充足时, 除可使第一

雌穗充分发育外, 还可进一步发育第二个腋芽形成第二个雌穗。因此玉米的熟性及其产量潜力有很大的可塑性。而具有固定生长点的小粒谷物如小麦、水稻, 终其一生主要生长点都在主茎茎尖, 其所需积温及产量潜力的变幅都小得多。因此, 玉米在对付温室效应、气候变化的农业对策中占有重要地位。

3.1 气候变暖情景下玉米增产率估计

文献[12]选用5个包括较多物理过程的全球大气环流模式(AGCM)模拟计算 CO_2 倍增后我国地面气温变化情景, 5个模式的综合结果, 全国冬季变暖为 $3.1\text{--}3.7^{\circ}\text{C}$, 夏季为 $1.8\text{--}5.1^{\circ}\text{C}$, 其中北方玉米主产区冬季变暖超过 4°C , 夏季变暖小于 4°C 。以东北、华北地区夏季气温每增加 1°C , 生长季积温可增加 $130\text{--}180^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 计, 可算出北方玉米产区在适应气候变暖更换熟期更长的品种时的潜在增产值, 按当前玉米产量相当于潜在产量的 $20\text{--}28\%$ 估计, 算出实产增幅和增产率于表4。如以 CO_2 倍增后我国北方夏季增温 2°C 计, 采取更换熟期更长品种的策略, 玉米的增产率可达 $10\text{--}15\%$ 。

表4 适应气候变暖的玉米品种增产率

夏季增温/ $^{\circ}\text{C}$	积温增加/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$	潜在产量增幅/ $\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$	实产增幅/ $\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$	增产率/%
1	130—180	80—130	20—40	5—8
2	250—350	150—250	30—70	10—15
3	380—530	230—380	50—110	15—23

3.2 小麦玉米一年两熟制北缘地带的种植制度优化问题

华北地区小麦玉米两熟制的北界大约在 10°C 以上积温为 $4000^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 左右, 大体上在京郊平原至唐山一线, 夏玉米生长季节内(以6月20日—9月30日计)的积温约 $2400^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$, 仅够早熟玉米正常成熟的需要。在这一地区, 两茬平播虽能获得全年高产, 但三夏三秋时间短, 农活紧, 因而大大增加了农机投入, 增加了粮食生产的成本,

形成高产低效益。根据表2的资料,对于这一地区的熟制与全年产量的关系,得出一个新的看法:在现有玉米品种熟性配套条件下,两年三熟制的产量可以不低于一年两熟制。京郊自6月20日至秋季,气温稳定通过 10°C 的积温有 $2734^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 。两年三熟制的夏播玉米可以采用中熟种玉米,其生产潜力可比只需 $2400^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 积温的早熟种玉米增产 $200\text{kg}\cdot\text{亩}$ 以上。由春玉米播种期至9月20日前的积温有 $3600^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 左右,生长期长度超过160天,目前我国晚熟种如掖单13、沈单7号等生长期约140天左右,需积温约 $3000^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$,则目前条件下晚熟种的春玉米可比早熟种夏玉米增产 $250\text{—}300\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$ 。因此,两年三熟制的中熟种夏玉米和晚熟种春玉米比一年两熟制的两季夏玉米增产量,足以抵上少种一季小麦的产量,而成本则可以显著降低,且可以减少晚播麦面积,有利于提高小麦单产和减少遇冷冬受冻害减产的风险。以上分析,已有部分生产实例,并引起农业部门的注意,正计划进一步开展优化种植制度的试验研究。上述两年三熟制与两熟制总产量持平的地区大致位于积温为 $3800\text{—}4300^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 的地带,即华北平原的北部到东北平原的南部辽南地区,包括清种两熟和套种两熟地区。

我国目前玉米品种熟性配套中,具有更大增产潜力的特晚熟品种还是空白。如能育成生育期长度超过150天,需积温超过 $3300^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以上的特晚熟种,上述地区的两年三熟制产量还可以高于两熟制。特晚熟种玉米在春玉米一熟制的南部,积温超过 $3500^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ 以上的地区也有广阔的种植前景,这一类地区目前由于缺少特晚熟种而使可贵的光热资源未能充分利用,而影响玉米产量提高。

致谢:承山东农业大学胡昌浩、石河子农学院涂华玉、吉林省农科院潘铁夫诸先生提供宝贵资料,北京农业

大学郑丕尧先生、北京市农科院陈国平先生提出宝贵意见,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 WMO (1985). Report of the WMO/UNEP/ICSU-SCOPE Expert Meeting on the Reliability of Crop-Climate Models for Assessing the Impacts of Climatic Change and Variability, WCP-90, WMO, Geneva, 31.
- 2 王馥棠等 (1991). 气候变化对我国东部主要农业区粮食生产影响的模拟试验. 中国气候变化对农业影响的试验与研究, 北京: 气象出版社, 1991: 75-81.
- 3 Murray, J. D (1989) Mathematical Biology, Springer-Verlag, 2-4.
- 4 邓根云等, 小麦分蘖的数学模式及其在栽培和农业气象中的应用. 农业气象, 1981, 4: 15-20.
- 5 戴俊英等. 高产玉米的光合作用系统参数与产量的关系. 沈阳农业大学学报, 1988; 19卷3期: 1-8.
- 6 胡昌浩等. 夏玉米同化产物积累与养分吸收分配规律的研究, 中国农业科学, 1982, 56-64.
- 7 涂华玉等. 玉米对养分吸收、干物质积累与叶面积发展动态的探讨. 石河子农学院学报, 创刊号: 13-24.
- 8 Wit, C.T.de. Physiological Potential of Crop Production. Plant Breeding Perspectives. Snecp, J. et al. (Eds). Pucoc, Wageningen, 1979: 47-81
- 9 Tolleaar, M. What is the Current Upper Limit of Corn Productivity in: Conference on Physiology, Biochemistry and Chemistry Associated with Maximum Yield of Corn. StLouis, Mis., 1985. Nov. 11-12.
- 10 Loomis, R.S. and P.A. Gerakis (1975) Productivity of Agricultural Ecosystems, Photosynthesis and Productivity in Different Environments, 145-172.
- 11 Nelsen, W.L. and H.F. Reetz Jr. Herman Warsaw's High Corn Yields. Crops and Soils Magazine, 1986. June/July; 5-7
- 12 赵宗慈. 模拟气候变化对我国气候变化的影响, 气象, 1989; 15(3): 10-14.

(下转第7页)

A Model on Relationship between Potential Corn Yield and Accumulated Temperature and its Application

Deng Genyun Liu Zhongli

(Centre of Agrometeorology, Beijing Meteorological Bureau, 100081)

Abstract

In year, The observation of 10 sorts of corn hybrids with different maturing dates called early, medium and late corns and with their different leaf angles such as erectophile and planophile have been taken in Beijing, Yanqing County (Beijing area), Taian (Shandong Province), Gongzhuling (Jilin Province) and Shihezi(Xinjiang Aitononous Region), Based on the data obtained from the observations, a normal growing function was derived on the princple laws of th accumulated dry matter

$$W = (1 + e^{8.56 - 13.52u})^{-1}$$

In accordance with the function, the authors built up a model of the potential maximum biomass dependent on the accumulated temperature. $B_{max}/kg \cdot \mu^{-1} = 100 + 1.11 \sum T_m$. The model was applied to estimate the potential corn yield of the hybrids different maturing and the results in assessing the impact of climatic change are discussed.

Key Words: climate change potential yield accumulated temperature