

基于分期播种的气候变化对东北地区玉米 (*Zea mays*) 生长发育和产量的影响

马树庆¹, 王 琪², 罗新兰³

(1. 吉林省气象台, 长春 130062; 2. 吉林省气象科学研究所, 长春 130062; 3. 沈阳农业大学, 沈阳 110010)

摘要: 利用在东北地区中部开展玉米 (*Zea mays*) 分期播种试验资料, 分析气候变化对玉米出苗速度、生长发育速度、灌浆过程、植株干物质积累和产量的影响, 进而分析未来气候变化对东北地区玉米生产的影响及适应性对策。结果表明, 气候变化对玉米生长发育和产量的影响十分明显, 在水分基本适宜的条件下, 东北地区气候变暖导致玉米生长季气温升高、积温增加, 使玉米生长发育和灌浆速度加快, 生物量增加, 从而提高单产。但气候变暖的同时, 气候变干会限制热量资源的利用, 将缩短玉米灌浆时间, 降低灌浆速率, 使千粒重下降, 从而造成明显减产, 而且减产幅度明显大于温度升高的增产幅度。在水分条件基本得到满足的条件下, 未来夏半年气候变暖对东北地区玉米生产是有利的, 偏晚熟玉米品种比例可以适当扩大, 东北玉米带可以向北部和东部扩展, 单产和总产都会增加; 但如果水分得不到满足, 气候的暖干化趋势会使东北地区的中、西部玉米主产区的农业干旱变得更加严重且频繁, 造成产量下降和不稳定, 给玉米生产带来严重威胁, 因而更应加强农业干旱的综合防御工作。

关键词: 玉米; 分期播种试验; 生长和产量; 气候变化; 东北地区

文章编号: 1000-0933(2008)05-2131-09 中图分类号: Q142, Q948, S181 文献标识码: A

Effect of climate change on maize (*Zea mays*) growth and yield based on stage sowing

MA Shu-Qing¹, WANG Qi², LUO Xin-Lan³

¹ Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun 130062, China

² Institute of Meteorology Science of Jilin Province, Changchun 130062, China

³ Shenyang agriculture university, Shenyang 110015, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2131 ~ 2139.

Abstract: The experiment of sowing by stages can develop different conditions of climate change for maize (*Zea mays*) growth in natural fields. Using method of statistic analyses, effect of climate change on maize growth and yield was researched according to 6 years' data of the experiment of sowing by stages in the middle of the maize belt of the Northeast China. Here climate change indicated mainly changes of temperature and humidity. The seedling emergence rate, growth rate, filling process, and accumulation of dry matter were indications of the situation of maize growth.

Changes of air temperature and humidity can influence obviously vegetative and reproductive growth and production of maize. Under the conditions of normal moisture, if air temperature rises 1 °C, there will be 3 days ahead of time in sprouting stage of maize; about 6 days and 4 days will be reduced during the period of seedling emergence to tasseling stage and tasseling to mature stage respectively; the seedling emergence rate and growth rate after sprouting stage will increase by

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAD04B02)

收稿日期: 2007-02-04; 修订日期: 2007-08-23

作者简介: 马树庆 (1959 ~), 男, 辽宁凤城人, 研究员, 主要从事农业气象和农业生态研究及相关决策服务工作. E-mail: Jlmasq@yahoo.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Science Sustain Key Project of China (No. 2006BAD04B02)

Received date: 2007-02-04; **Accepted date:** 2007-08-23

Biography: MA Shu-Qing, Professor, mainly engaged in agrometeorology and ecology. E-mail: Jlmasq@yahoo.cn

17%。If relatively cumulative temperature increases by 10%, relative dry weight of 100 grains of maize will increase by 13%。However, filling time will shorten obviously and grain weight will lighten if air humidity is low during filling period。If cumulative temperature of main growing season increases by 100 °C·d, per unit area yield of maize will increase by about 6.3%; and if mean temperature rises 1 °C during the period of tasseling to mature stage, per hectare yield of maize will increase by about 550 kg; but if aridity index increases 0.1 during the same time, per hectare yield will decrease about 860 kg。When temperature is above 22 °C during the period of tasseling to mature stage, if aridity index is between 0.75 and 0.9, maize yield will reach to the maximum, that means that cooperation between higher temperature and larger humidity is favorable to maize filling and mature and yield increase。

Under the conditions of suitable moisture, climate warming speeds up maize development and filling and makes biomass increase, so that per unit area yield of maize increases; however, climate drying limits use of heat resources, shortens maize filling time and rate, and decreases weight of 1000 grains of maize in growth season of the Northeast China, so that maize yield decreases。In the future, under the conditions of climate warming and suitable moisture, planting area of late maize should be expanded and the maize belt should extend to the north and the east of the Northeast China, per unit area yield and ultimate production of maize will increase。But trend of climate warming and drying would result in more serious and frequent drought of main planting area of maize in the middle and the west of the Northeast China, which will bring about maize yield decrease and uncertainty and threaten seriously future development of maize production。So, to enhance comprehensive defense of agricultural drought is prerequisite for to suit future climate warming and drying and spread middle-late and late variety of maize。

Key Words: maize (*Zea mays*); experiment of sowing by stages; growth and yield; climate change; Northeastern of China

气候变化及其对农业生产的影响研究是近些年农业气象和全球变化研究的热点。玉米(*Zea mays*)是我国主要粮食作物之一,拥有世界著名的东北玉米带和华北玉米带,其中东北玉米带的玉米播种面积 500 多万 hm^2 , 玉米年产量近 4000 万 t, 占全国的 30% 左右,是我国出口玉米生产基地,在国家粮食安全保障战略中居于重要地位。因此,近些年气候变化对北方地区玉米生长发育及产量影响的研究和玉米生产对气候变化响应的研究论文和成果较多,其中王馥棠、叶修祺、马树庆、丁一汇、王石立、尚宗波、王春乙和张厚瑄等不少学者都分析了气候变化对东北地区玉米生长发育、产量形成及品种布局变化的影响情况^[1-13],指出未来气候变化对东北地区玉米生产的利弊影响及适应气候变化的玉米生产对策。

近年来关于气候变化对玉米等农作物影响的研究方法比较多,可归大致纳为 5 种。一是用统计的方法,分析历年粮食产量波动与历年气温、降水等因子的关系,建立线性或非线型方程,分析气象要素变化对玉米产量的影响;二是建立动态模拟模型,将未来气候变化设定为几种可能情景,分析在不同的气温、降水、日照和大气 CO_2 浓度变化情形下,玉米生长发育进程和产量的可能变化;三是在人工气候室内设定一定的气候变化情形,观测气温、土壤水分、日照和空气 CO_2 浓度变化对玉米生长发育的影响;四是建立基于经验和玉米生态学理论的经验模型和判别指标,研究未来气温升降和降水增减对玉米生产的影响;五是通过年代际的作物及其品种的演变,分析玉米生产发展对气候变化的响应,进而分析未来气候变化可能对区域化玉米生产布局的影响。这些研究多数是针对目前和未来气候变暖和大气 CO_2 浓度上升这一现实的问题。分期播种试验虽然是农业气象和生态学比较传统的研究方法,但也是气候变化对作物影响研究较为适用的科学方法。分期播种试验可以在自然农田条件下创造出不同的气候变化情形,通过可观测到的气象要素变化和作物生长及产量变化,建立相应的模式,分析气候变化对玉米生长发育和产量的影响,而且可以分析玉米不同生育时期对气候变化的反应。为此,本文采用在东北地区中部进行的玉米分期播种试验资料,研究气候变化对玉米生长发育和产量的影响,提出东北玉米带适应未来气候变化的玉米生产对策。

1 试验资料及分析方法

1.1 试验方法及资料

采用沈阳农业大学农业气象专业师生 1977 ~ 1982 年在辽宁省铁岭市开展的玉米分期播种试验资料。铁岭市位于辽宁省北部,是东北玉米带的腹地,处于温暖、半湿润季风气候区内,积温和降水都比较丰富,气候、土壤条件适合玉米栽培,玉米单产比较高,其气候、土壤等农业生态条件和试验结果在东北玉米带中有代表性。

供试品种为丹玉六,是当时的晚熟高产品种。该试验共进行了 6a,每年的播期设置并不相同,有的年份分 5 个播期,有的 3 个播期。播期在 4 月 5 日至 6 月 5 日之间,每隔 5d 或 10d 一个播期。试验田株行距为 33.3 cm 和 60.0 cm,密度为 49500 株/hm² (5 株/m²),每个小区面积为 36 m²。各试验小区土壤肥力均为中上等,各播期农田投入和其它管理基本一致,均为当地中上管理水平。每年设 1 ~ 3 个重复不等,随机区组排列。为了扩大样本容量,在分析温度对玉米生长发育的影响时,将每个小区每个重复都视为一个样本,这样分析时最多有 62 个可用的有效数据。

试验观测项目为:播种期,玉米出苗、三叶、七叶、拔节、抽雄、吐丝、乳熟、黄熟和成熟期出现时间(普遍期),植株生物量、灌浆进程(每隔 3d 测定百粒干/湿重)和单产。由于工作量限制,灌浆进程、生物量和单产并没有每个小区都测定。观测方法依照《农业气象观测规范》。

气象资料取自距试验地 1km 内的铁岭市气象站。采用的资料分别为 1977 ~ 1982 年农业生产季节内的逐日气温和降水等资料。

1.2 分析方法

以分期播种试验资料为基础,分别建立不同时期玉米生长发育速度、灌浆情况、干物质积累和产量变化与气温、积温和气候干燥度的统计相关模式,分析气候变化对玉米生长发育、产量形成和单位面积产量的影响,进而预估在未来气候变化情景下,东北地区玉米生长发育及产量可能发生的变化,并提出适应气候变化、防御气象灾害的农业生产对策。气候干燥度采用张保坤的干燥度指数:

$$k = 0.16 \frac{\sum T \geq 10}{R}$$

式中, $\sum T \geq 10$ 为玉米某生长发育期内日平均气温大于 10℃ 的活动积温, R 为同期的降水量, k 为干燥度, k 值越大,表明当地该阶段气候越干燥,反之则表示气候湿润。

2 结果与分析

2.1 气候变化对玉米生长发育速度的影响

根据生态和农业气象原理,在土壤水分基本相近的条件下,作物生长发育速度的快慢主要取决于温度条件。由于所试验的几年内玉米播种到抽雄期间的各时期都没有发生比较明显的干旱,土壤水分基本适宜,因而可以认为,在该试验条件下,玉米生长发育速度主要由所处的温度条件决定。把完成某一发育阶段所需日数(n)的倒数($1/n$)看作是玉米在该阶段的发育速度,根据试验结果作相关分析,得到玉米不同生育期间间隔日数、生长发育速度与气温和干燥度等因子的关系如表 1 所示。

2.1.1 温度变化对玉米出苗速度的影响

由于试验期间各播期播种至出苗土壤相对湿度在 70% ~ 85% 之间,属于适宜范围,没有出现明显的偏旱或偏涝,可以认为种子发芽和出苗速度没有受到水分的限制,因而只分析发育速度与气温的关系。结果表明,各时期发育速度与气温的相关性都是极显著的,气温越高,完成某一发育期所用的时间越短,生长发育速度越快。如图 1 和式(1~2)所示,出苗速度与温度的关系是非线性的,即在不同温度水平上,单位温度变化对玉米出苗速度的贡献不同,例如在 $T = 20$ °C 时的出苗速度是 $T = 10$ °C 时的 4 倍左右。在平均温度水平上,气温增加 1 °C,出苗速度提升 17%,间隔时间缩短 3d 左右,可见东北地区未来气候变暖有利于提高玉米出苗速度,缩短玉米播种至成熟的时间。对方程进行分析可知,玉米出苗期间平均气温的下限温度为 9.8 °C,正常情

况下所需有效积温 68.8 ℃·d,需活动积温 220 ℃,播种至出苗需 15 d 左右。

表 1 气候变化对玉米生长发育速度影响模式

Table 1 Impact models of climate change on maize growth velocity

生育时期 Growth period	相关模式 Relation models	模式序号 Model order	样本数 Sample	相关系(指)数 Relate coefficient	相关程度 Significance
播种 ~ 出苗 Seeding — Emerge	$n = 135.1351e^{0.1465T}$	(1)	62	-0.94	极显著 Special marked
	$\frac{1}{n} = 0.0074e^{0.1465T}$	(2)	62	0.94	极显著 Special marked
	$\sum T \geq 10 = 68.8 + 9.8n$	(3)	62	0.97	极显著 Special marked
出苗 ~ 抽雄 Emerge — Handing	$\frac{1}{n} = 0.0018T - 0.233$	(4)	62	0.95	极显著 Special marked
抽雄 ~ 成熟 Handing — Mature	$n = 162.45 - 4.817T$	(5)	44	-9.0	极显著 Special marked
	$n = 104.7 - 60.9K \ (0.75 < k < 1.1)$	(6)	22	-0.61	显著 Marked
	$\frac{1}{n} = 0.0024t - 0.0383$	(7)	24	0.84	极显著 Special marked
	$\frac{1}{n} = 0.0248K - 0.0019 \ (0.75 < k < 1.1)$	(8)	22	0.61	显著 Marked
出苗 ~ 成熟 Emerge — Mature	$\frac{1}{n} = 0.0015T - 0.0225$	(9)	62	0.93	极显著 Special marked

T 为平均气温; n 是发育期日数; K 为其间的气候干燥度; $1/n$ 表示生长发育速度 T : temperature; n : days of Growth period; K : drid index ; $1/n$: growth velocity

2.1.2 温度变化对玉米营养生长和发育速度的影响

如图 2 和模式(4)所示,玉米主要营养生长期(出苗 ~ 抽雄期间)的发育速度与温度变化是线性关系,此时期平均气温增加 1 ℃,发育期延迟 6 d 左右,发育速度提升 18% 左右。

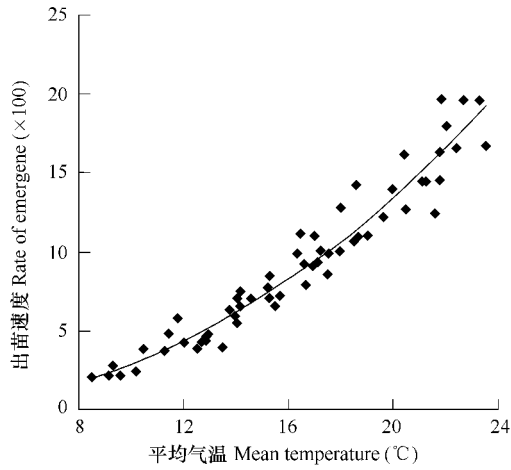


图 1 温度变化对玉米出苗速度的影响
Fig. 1 Impact of temperature change on rate of maize emerge

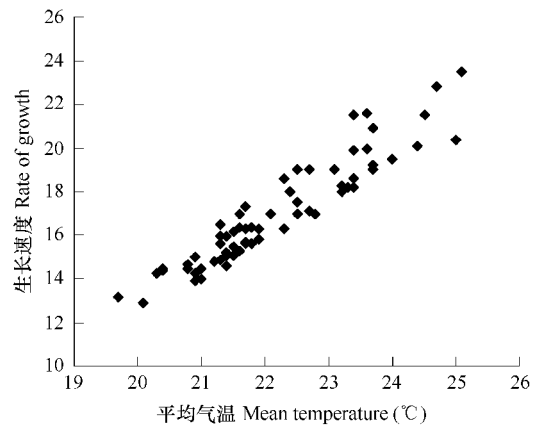


图 2 玉米出苗至抽雄期间温度变化对生育速度的影响
Fig. 2 Impact of temperature change on rate of maize growth period from emerge to heading

如图 3 和模式(9)所示,玉米出苗 ~ 成熟期间的平均气温与生长发育速度之间的关系也是线性的,平均气温升高 1 ℃,生长发育速度提升 14% 左右。可见,在水分基本适宜的情况下,东北地区未来气候变暖有利于提高玉米生长发育速度,缩短玉米生育期。

2.1.3 气候变化对玉米生殖生长的影响

玉米是喜温又喜水的作物,一般研究认为,水分条件只影响生长量,而对作物生长发育速度基本没有影响^[5, 7, 10],但试验发现,水分或气候干湿状况对玉米生殖生长速度或产量形成速度的影响比较明显。由于试验期间玉米生长发育的后期降水量在年际和播期之间差异比较大,因此在玉米抽雄至成熟期间,除了分析气温变化对玉米生长发育速度的影响外,还分析了气候干湿状况的影响。如表 1 中模式(5~8)和图 4 所示,此期间玉米生长发育速度和间隔日数与温度和干燥度的关系都是线性的,气候变暖和干燥度增大都使玉米灌浆成熟速度加快,缩短抽雄至成熟的时间。在干燥度为 0.7~1.1 的试验资料范围内,干燥度每上升 0.1 度,抽雄至成熟间隔日数缩短 6.1d,成熟速度提升 25% 左右;温度每上升 1℃,间隔日数缩短 4~5d。分析还发现,在温度正常条件下,气候湿润时,抽雄~成熟所用时间较长,气候干燥的情况下所用的时间较短。这说明,在湿润的条件下,气温高有助于提高灌浆速度,对增产有利;但在比较干燥的条件下,表现为高温干燥“逼熟”,灌浆时间短,并且降低灌浆速率,造成单产下降。

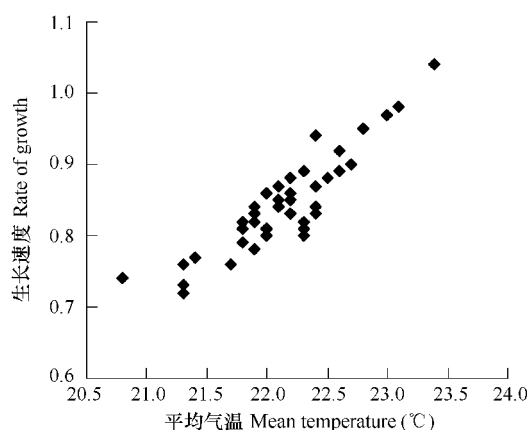


图 3 玉米出苗~成熟期间的气温变化对生育速度的影响

Fig. 3 Impact of temperature change on rate of maize growth in the period from emerge to mature

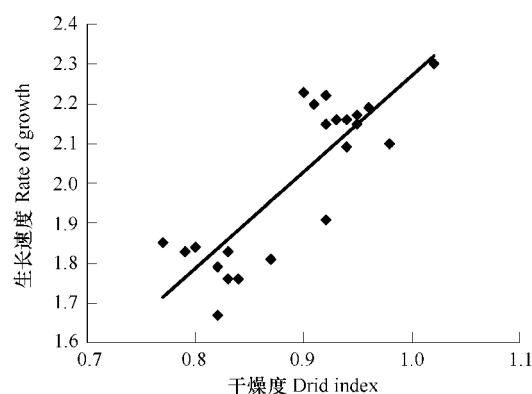


图 4 玉米生殖生长期气候干湿变化对生长速度的影响

Fig. 4 Impact of dry/moist condition change on rate of growth in maize reproduce growth

2.2 气候变化对玉米灌浆过程的影响

在水分条件基本满足的条件下,玉米籽粒干物质增长过程与灌浆期间积温的增长过程是一致的。采用玉米籽粒干物质测定资料,建立在水分条件基本满足的条件下,玉米灌浆期间相对百粒干重与相对积温的关系为模式(10):

$$y_i = 132.03x_i - 26.24$$

该方程样本数 50,相关系数 0.99,极显著。其中 y_i 为相对百粒干重,表示吐丝后每 3d 测定的百粒干重与成熟时最大百粒干重的比值; x_i 为相对积温,表示从吐丝开始,每个测定日的积温与吐丝至成熟总积温的比例。在玉米主要灌浆期间(相对百粒干重在 0.17~0.95 范围内),籽粒相对干重与相对积温呈线性关系,相对积温每增加 10%,相对于物重增加 13.2%,即,如果某年当积温累积到总积温的 90% 时气温就稳定低于 10℃ 或出现霜冻,则当年产量将减少 13.2% 左右。

由于不同播期的玉米灌浆过程处在不同的积温条件下,因而成熟时的最大百粒干重差异较大。例如,1981 年 4 月 18 日播种的玉米灌浆期间积温达到 1750℃·d 左右,百粒干重达到 24.8 g;而 6 月 8 日播种的积温为 1480℃·d 左右,最大百粒干重仅为 19.0 g,可见灌浆成熟期间热量条件变化对灌浆的影响是十分明显的,在水分基本适宜的条件下,玉米生长后期气候变暖有利于灌浆和产量形成。最大百粒干重($y_{\max}$)与灌浆期间的天数(m)也有密切关系,其方程为模式(11):

$$y_{\max} = 0.536 m + 0.72$$

样本数是 28(水分基本适宜的样本),相关系数 0.80,极显著,即灌浆时间每延长 1 d,百粒干重增加 0.54 g 左右。如前所述,灌浆期长短是由温度和气候干湿程度决定的,温度过高与气候干燥相配合时,会造成高温干燥“逼熟”的早衰现象,导致灌浆期缩短,玉米粒重下降。

2.3 气候变化对玉米植株生物量的影响

由于作物经济系数是比较稳定的,因而玉米经济产量的高低在很大程度上取决于生物量的大小,而生物量增长过程和最大生物量又取决于气象条件和土壤水肥条件。在土壤水肥条件基本满足时,玉米群体干物质积累过程与积温的关系可用生长曲线来描述:即模式(12)

$$y_i = \frac{1.0008}{1 + e^{7.19 - 12.64x_i}}$$

其相关指数达到 0.99,极显著相关。其中 x_i 是玉米从出苗到成熟期间某一时刻的相对积温, y_i 是这一期间某时刻玉米地上部分相对全干重。也就是说,玉米地上部分全干重的增长速度及最终数量大小主要是由积温的增长过程决定的。对(12)式求导数可知,当 $x_i = 0.57$ 时,玉米灌浆速度最快,即在玉米生长发育的中期(抽雄前的一段时间),积温增加最快,玉米全干重增加速度也最快。由此可见,用积温增长进程可以估计玉米地上部分生物量的增长进程,如果某年当积温累积到总积温的 80% 时出现重霜冻,则当年玉米将减产 20% 左右。

不同播期玉米地上部生物量增长进程差异较大。如表 2 所示,早播(1980 年 4 月 10 日)的比晚播(1980 年 5 月 31 日)的积温多 214 °C·d,结果早播的玉米地上部全干重、叶干重和叶面积指数都远比晚播的大,产量也明显偏高。表 2 的数据还表明,出苗至成熟期间的积温越多,植株生物量越大,叶面积也越大,产量越高,但玉米生育前期温度高低对地上部生物量的影响程度不如中、后期的明显,即积温对玉米干物质积累过程的影响在一定程度上有前后互补的作用,但主要表现在后期热量充足可以对前期有补偿作用,而反过来补偿作用不明显。这表明,未来气候变暖、积温充足有利于玉米地上部干物质积累,而且夏秋季节气候变暖更有利于玉米生物量积累和增产。

表 2 不同播种期的玉米主要生育期气温(°C)和地上部干物质重量(kg/hm²)的比较

Table 2 Compare between different seeding time on temperature and maize material amass (kg/hm²) in main growth periods

项目 Items	主要生育期 Growth period								
	出苗 ~ 15 叶 Emergence — 15 leaves		15 叶 ~ 乳熟 15 leaves — milk mature				乳熟 ~ 蜡熟 Milk mature — wax mature		出苗 ~ 成熟 Emergence — mature
	T_1	G_1	T_2	G_2	T_3	G_3	G_L	L	$\sum T$ (°C·d) Y (kg/hm ²)
播期 Seeding time (04-10)	20.1	1459.5	23.7	8220	23.3	21067.5	3384.0	3.6	2210.6 7647.0
播期 Seeding time (05-31)	23.4	2251.5	23.6	7567.5	21.7	14467.5	2383.5	3.1	1996.2 6554.3
差值 difference	3.3	792.0	-0.1	-652.5	-1.6	-6600.0	-1000.5	0.5	-214.4 -1092.7

T_1 、 T_2 和 T_3 分别是对应时期的平均气温, G_1 、 G_2 、 G_3 分别是 15 叶、乳熟和蜡熟时的地上部干物重, G_L 是蜡熟时地上叶干重, L 是蜡熟时叶面积指数, $\sum T$ 是活动积温, Y 是经济单产 T_1 、 T_2 and T_3 : temperature in different Growth period; G_1 、 G_2 、and G_3 : maize material amass; G_L : leaves material amass; L : leaves area index; $\sum T$: accumulated temperature; Y : maize yield

2.4 气候变化对玉米产量的影响

气候变化对玉米生长发育速度、生物量和灌浆过程影响的最终结果将在产量高低上体现出来。玉米播种至出苗平均气温与产量的关系大致呈抛物线形,播种过早或过晚产量都比较低,而适当早播,即 4 月末前后播种的,播种至出苗平均气温在 12 ~ 14 °C 左右,产量最高。这一温度范围可以保证玉米正常发芽和出苗,特别是可以使玉米出苗后的各个生长发育过程都能处在基本适宜的气候环境条件下,因而产量最高。

玉米出苗至成熟期间积温距平(ΔX , °C·d)与相对单产(y %)之间的关系如图 5 所示,其方程为模式(13):

$$y = 1.00 + 0.00063 \Delta X$$

样本数 42, 相关系数 0.90, 极显著, 即, 积温每增加 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 产量增长 6.3%。抽雄至成熟期间平均气温 (T) 与产量距平 (Δy , kg/hm^2) 之间的关系方程为模式 (14):

$$\Delta y = 564.75T - 12312.75$$

该式样本数 28, 相关系数 0.66, 极显著相关。可见, 在水分比较适宜的条件下, 玉米生育期气候变暖、积温增加对玉米增产是有利的。但是, 如果气温升高伴随雨水减少, 导致气候变干, 则产量将下降。例如, 抽雄至成熟期间气候干燥度 (K) 与单产距平 (Δy , kg/hm^2) 的关系如图 6 所示, 其方程为模式 (15):

$$\Delta y = 7751.03 - 8630.47 K$$

该式样本数 28, 相关系数 -0.64 , 极显著。即在玉米抽雄至灌浆成熟期间, 在一定范围内, 干燥度每提升 0.1 度, 公顷产量下降 863kg 左右。这充分说明, 在土壤养分条件基本满足的条件下, 玉米产量高低是气温和气候干湿状况共同决定的, 气候变化对玉米产量的影响要看气候变暖与干、湿的相互配合。图 7 表明抽雄至成熟期间的平均气温和干燥度变化对玉米产量的综合影响是明显的, 气温高于 22°C , 干燥度在 0.75 ~ 0.90 之间玉米产量比较高, 是最佳水热组合; 当干燥度大于 0.9 时, 尽管气温较高, 产量也不一定高; 而当气温低于 22°C 时, 尽管干湿条件适宜, 产量也比较低。这表明, 未来气候在变暖的同时变得比较湿润, 则对玉米增产是有利的, 而在变暖的同时变干, 则不会增产, 甚至会减产。

2.5 未来气候变化对东北地区玉米生产的影响

试验资料表明, 气候变化, 特别是气温和空气干湿状况的变化对东北地区玉米生长发育和产量形成的影响是明显的。尽管多数研究表明东北地区气候变暖以冬季变暖和最低温度升高为主^[1,8,15], 但根据有关资料分析, 未来 40 ~ 50 a 左右夏半年气温升高 1.0°C 左右、农业活动积温增加 $150^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 左右是很有可能的^[1,4,5,13,18]。上述试验表明, 在水分条件基本正常的条件下, 玉米发育期平均气温上升 1°C , 东北地区玉米出苗速度提高 17%, 播种至出苗的持续时间缩短 3d 左右; 出苗至抽雄持续时间缩短 6 d 左右, 抽雄至成熟期缩短 4 d 左右。玉米灌浆速率和生物量也相应增长。出苗 ~ 成熟期间气温上升 1°C , 相当于积温增加 $150^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 左右, 玉米有效生长期缩短 9 d 左右, 这相当于东北地区农业气候带向北平移了 100 多公里、向东部山区推移 80 多公里, 向高海拔地带提升 160 m 左右^[5,7,8]; 玉

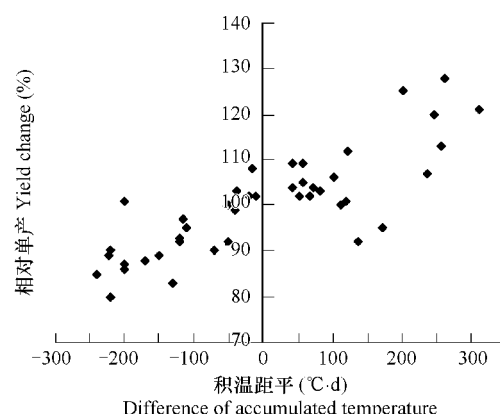


图 5 出苗至成熟期间积温变化对玉米产量的影响

Fig. 5 Impact of accumulated temperature change on maize yield from emerge to mature period

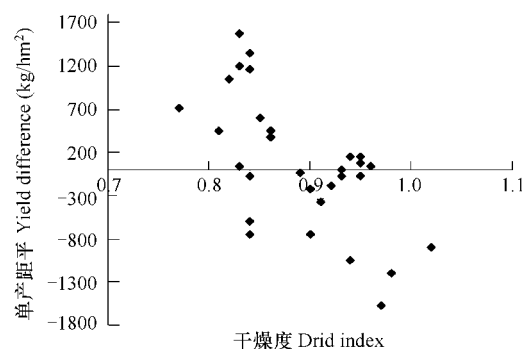


图 6 抽雄至成熟期间气候干燥度变化对玉米单产的影响

Fig. 6 Impact of dry index change on maize yield from heading to mature period

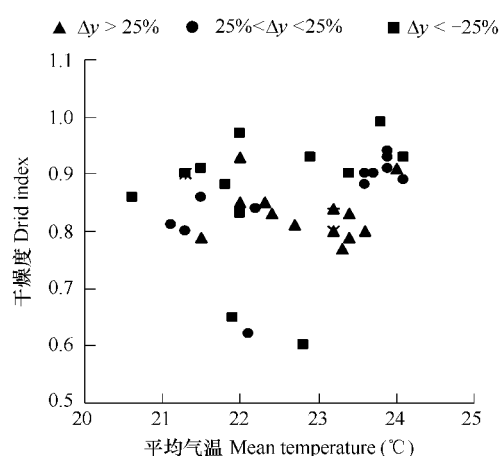


图 7 玉米抽雄至成熟期间的平均气温和干燥度变化对玉米产量的综合影响

Fig. 7 Synthesize impact of temperature and dry index change on maize yield from heading to mature period

米品种分布带也相应地产生地域变化,目前采用早熟品种的东北地区北部和东部山区可以采用中熟品种,目前采用中熟品种的黑龙江省中、西部和吉林省东部半山区可采用中晚熟品种,而吉林省中、西部可采用晚熟品种,辽宁省各地采用晚熟品种仍有剩余积温,南部可施行两熟制^[4,5,8],各地产量将由此增加 10% 左右^[1,4]。如果品种布局不变,则播种期可推迟 9 d 左右,或成熟期可提前 9 d 左右,会明显减轻低温冷害和霜冻害的影响^[4,5,16]。从这方面看,未来气候变暖对东北地区玉米生产是有利的。应该指出,采取适应气候变暖的生产措施是增产的重要途径,而如果气候变暖后农业措施不变,则增产潜力不能得到充分发挥,但也不会因高温而减产。

有关研究表明,东北地区气温上升最有可能的是伴随降水减少,气候变干^[1,4,15,17]。夏半年气候变干,特别是玉米产量形成期间气候干燥,会使玉米灌浆时期明显缩短,灌浆不充分,百粒重将明显下降,从而造成减产。试验结果表明,玉米灌浆成熟期气温升高 1℃,玉米单产可增加 500 ~ 600 kg/hm²,而此时期干燥度上升 0.1 个百分点,则玉米公顷产量将减少 860 kg 左右,减产幅度大于气温升高 1℃ 的增产幅度。这表明,尽管未来夏秋季气候的暖干化可使玉米灌浆成熟期明显提前,但玉米产量并不会增加,甚至要减产。这种情况对于目前是半湿润和半干旱气候的东北中、西部玉米主产区是最可能出现的^[2,4,5,8]。气候的暖干化,加之玉米生长季的延长将需要更多的水分,则农田水分胁迫加剧,干旱将趋于频繁和严重,如果农田水利建设上不去,则玉米单产将明显下降,对玉米生产构成巨大威胁^[1,14,15]。未来气候的暖干化对目前气候冷凉湿润的东部长白山区及东北北部高寒地区玉米生产是有利的^[1,4,5,9],但这些地区耕地和玉米种植较少。如果未来气候变暖的同时变得湿润,特别是玉米抽雄至成熟期间气候暖湿化,则有利于玉米延长灌浆期,提高灌浆速度,产量将明显提高,但这种情况对东北玉米主产区来说出现的可能性很小。

3 结论与讨论

(1)分期播种试验表明,东北地区气候变化对玉米生长发育和产量的影响是很明显的。正常水分条件下,平均气温上升 1℃,玉米出苗期提前 3 d 左右,出苗至抽雄期间缩短 6 d 左右,抽雄至成熟期间缩短 4 d 左右,全生育期缩短 9 d 左右,出苗速度和出苗以后的生长发育速度提升 17% 左右。在吐丝至成熟期间积温增加 10%,玉米百粒重增加 13%;干燥度增加 0.1℃,灌浆期缩短 6 d 左右,灌浆速率和产量明显下降。积温增加使玉米干物质积累时间长,干物重明显增加,生育期积温增加 100℃·d,玉米每公顷总干重增加 500kg 左右,单产增加 6.3% 左右;抽雄至成熟期平均气温上升 1℃,公顷产量增加 550kg 左右;干燥度上升 0.1 度,玉米公顷产量下降 860 kg 左右;抽雄至成熟期间气温在 22℃ 以上,干燥度在 0.75 ~ 0.90 之间玉米产量最高。

(2)在水分基本满足的前提下,东北地区未来夏半年气候变暖对玉米生产是有利的。气候变暖使农业气候带向北、向东部山区平移,可采用偏晚熟玉米品种,玉米等喜温作物比例可以增加,则玉米单产和总产都将明显增加,低温冷害和霜冻也会明显减轻。但东北地区气候变暖最有可能伴随降水减少和气候变干,而气候变干对玉米生物量积累和产量形成都有不利影响,特别是灌浆成熟期将明显缩短,灌浆速率下降,从而造成减产。未来气候的暖干化对于占东北地区玉米产量 80% 以上、气候半湿润和半干旱的中、西部玉米带而言,农业干旱将趋于严重而且频繁,对玉米生产和玉米带的发展构成严重威胁,而对目前冷凉湿润的东部山区将是有利的。

(3)东北地区适对气候变暖的农业对策,一是趋利,即在水分条件基本得到满足的前提下,调整玉米品种布局,适当扩大晚熟、中晚熟品种的比例,提高单位面积产量;同时可调整种植结构,北部和东部冷凉地区玉米等喜温作物比例可适当增加,目前的东北玉米带可以适当向北部和东部拓展,辽宁大部还可以调整种植制度,例如变目前玉米一熟为玉米-小麦两熟或米-麦间作。二是防御灾害的对策。为了应对未来气候的暖干化趋势,防御农业干旱,在推广中晚熟和晚熟品种的同时,必须大力培育抗旱品种,研发抗旱、节水栽培技术,大力兴建农田水利,扩大旱田水浇地面积,以便防御干旱威胁,保证东北玉米带的持续发展,保障国家粮食安全。此外,还应加强农业生态环境建设和病虫害防治工作。

References:

- [1] Wang F T, Zhao Z C, Wang S L, *et al.* Impact of climate on agriculture ecologic. Beijing: Meteorological Press, 2003. 20—150.
- [2] Ye X Q. Influence of climate warming on maize production in China. In: Impact and countermeasure of climate change on agriculture. Beijing: University Press, 1993. 161—190.
- [3] Zang H X. Several view for influence of climate change on agriculture ecologic. Chinese Journal of Agrometeorology, 1992, 13(3): 20—23.
- [4] Ma S Q. Influence of climate change on grain yield of northeastern of China and countermeasure. Journal of Meteorology, 1996, 54(4): 484—492.
- [5] Bi B J. Impact of climate warming on agriculture ecologic in northeastern of China and countermeasure. Chinese Journal of Applied Ecology, 1991, 2(4): 334—338.
- [6] Ding Y H, Gao S H. Study on influence of trace air on agriculture and ecologic system in China. Beijing: Science and Technology Press, 1995. 148—164.
- [7] Ma S Q. Study on agroclimate of Jilin Province. Beijing: Meteorological Press, 1996. 166—180.
- [8] Ma S Q, Dai Ge wen. Change on grain Yield and their countermeasure game methods in the northeast China. Environment and Biometeorology. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1995. 504—509.
- [9] Ma S Q. The climate warming and its influence on crops and variety layout in Northeast China. Beijing: China. International symposium on Climate change (ISCC). 2003, 330—331.
- [10] Sang Z B. Influence of global climate change on maize growth in Shenyang City, Journal of Plant, 2000, 42(3): 300—306.
- [11] Zang H X. The tactics on respond of agriculture on climate change in China. In: collected works of influence of climate on agriculture in China, Beijing Meteorological Press, 1997, 489—496.
- [12] Wu J D, Wang S L, Zhang J M. Simulate of influence of future climate change on water and thermal condition in northeastern of China. Resources Science, 2000, 22(6): 36—42.
- [13] Wang C Y, Lou X Y, Zhuang L W. Impact of climate warming on crop plant in northeastern of China. Meteorological Science and Technology, 2001, 29(supplement): 11—13.
- [14] Bai L P, Sui F G, Sun C H. Impact of soil water coerce on maize shape and yield. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1556—1560.
- [15] Wang S L, Zhuang L W, Wang F T. Study on influence of climate warming on water and thermal condition in northeastern of China in recent 20 years. Journal of Applied Meteorology, 2003, 14(2): 152—164.
- [16] Fang X Q, Wang Y, Zhu X. The adapt action of climate change and the change of summer Chilling injury in Heilongjiang Province. Journal of Geographic Study, 2005, 24(5): 664—672.
- [17] Wang L, Xie X Q, Li Y S, *et al.* The change of moist index and arid/humid climate limits in Northern of China in recent 40 years. Journal of Geographic Study, 2004, 23(1): 5—54.
- [18] Gao F, Sun C Q, Qu J X, translate. New know on global climate change — Essentials of third climate judge report of IPCC. Journal of Advance on Geoscience, 2001, 16(3): 441—445.

参考文献:

- [1] 王馥棠, 赵宗慈, 王石立, 等. 气候变化对农业生态的影响. 北京: 气象出版社, 2003. 20—150.
- [2] 叶修祺. 气候变暖对我国玉米生产的影响. 见: 信乃诠. 气候变化对农业影响及其对策. 北京: 北京大学出版社, 1993. 161—190.
- [3] 张厚瑄. 关于气候变化对我国农业生态环境影响及对策的几点看法. 中国农业气象, 1992, 13(3): 20—23.
- [4] 马树庆. 气候变化对东北地区粮食产量的影响及其适应性对策. 气象学报, 1996, 54(4): 484—492.
- [5] 毕伯钧. 气候变暖可能给东北农业生态环境的影响及对策. 应用生态学报, 1991, 2(4): 334—338.
- [6] 丁一汇, 高素华. 痕量气体对我国农业和生态系统影响研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 148—164.
- [7] 马树庆. 吉林省农业气候研究. 北京: 气象出版社, 1996. 122—131, 290—305.
- [10] 尚宗波. 全球气候变化对沈阳春玉米生长发育的影响. 植物学报, 2000, 42(3): 300—306.
- [11] 张厚瑄. 中国农业响应气候变化的策略问题. 见: 气候变化对中国农业影响研究论文集. 北京: 气象出版社, 1997. 489—496.
- [12] 吴金栋, 王石立, 张建敏. 未来气候变化对中国东北地区水热条件影响数值模拟研究. 资源科学, 2000, 22(6): 36—42.
- [13] 王春乙, 娄秀荣, 庄立伟. 气候变暖对东北地区作物种植的影响. 气象科技, 2001, 29(增刊): 11—13.
- [14] 白莉萍, 隋方功, 孙朝辉, 等. 土壤水分胁迫对玉米形态和产量的影响. 生态学报, 2004, 24(7): 1556—1560.
- [15] 王石立, 庄立伟, 王馥棠. 近20年气候变暖对东北农业生产水热条件影响的研究. 应用气象学报, 2003, 14(2): 152—164.
- [16] 方修琦, 王媛, 朱晓. 气候变化的适应行为与黑龙江省夏季低温冷害的变化. 地理研究, 2005, 24(5): 664—672.
- [17] 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 中国北方地区40年来湿润指数和气候干湿界限的变化. 地理研究, 2004, 23(1): 5—54.
- [18] 高峰, 孙成全, 曲建新, 编译. 全球气候变化的新认识——IPCC第三次气候评估报告第一工作组报告概要. 地球科学进展, 2001, 16(3): 441—445.