

“高温”对我国小麦生长发育及产量的影响

高素华 郭建平 赵四强 张 宇 潘亚茹

(中国气象科学研究院农业气象研究中心, 北京 100081)

摘 要 本文通过田间试验、人工气室模拟试验、历史资料统计分析及采用 CERES 冬小麦模式, 分析“高温”对小麦(春小麦、冬小麦)发育历期、产量结构及经济产量的影响。结果表明: 随温度升高, 小麦发育历期缩短, 高温使春小麦经济产量下降, 温度升高改善了冬小麦越冬条件, 对穗粒数及籽粒重有利。返青后的“高温”对冬小麦经济产量不利。

关键词 小麦 生长发育 产量 “高温”影响

1 引言

气候变暖对农业生产的影响有明显的区域差异, 也就是说, 温度升高使有些国家(地区)受益, 但有些国家(地区)是弊大于利。根据马丁·帕里(M. Parry)在气候变化与世界农业一本书的估计, 认为中国在二氧化碳倍增气候变暖的情况下, 中国粮食产量有可能增加 25%^[1]。按此观点, 中国是受益最大的国家之一。为了评估温度变化对粮食作物产量的影响, 我们进行了此项研究。我们的结果与马丁·帕里及其他一些人的估计有较大的出入。本文介绍温度变化对作为我国主要粮食作物之一的小麦生长发育及产量的影响。

2 研究方法

我们采用田间试验、人工模拟试验和历史资料分析模拟及 CERES 小麦模式相结合的方法研究温度变化对小麦生长发育及产量的影响。小麦包括春小麦和冬小麦。

春小麦:

为了研究高温对春小麦生长发育及产量的影响, 采用分期播种和地理播种相结合、大田与客土盆栽(为消除土壤因素的影响)相结合的试验方法。分别选择宁夏永宁县(灌溉农业区)和固原县(雨养农业区)两个试验点。两地年平均气温分别为 8.6°C 和 6.2°C (相差 2.4°C), 永宁年降水量 200 mm 左右, 轻壤土, 肥力水平较高; 固原年降水量 400 mm, 沙土, 保水保肥性较差。试验分别在 1989 年和 1990 年进行, 每年 3 个播期(第 1 期为目的适宜播期), 每期间隔 15 天。供试品种为当前主要种植品种永良四号红芒麦。

除上述田间试验外, 我们还采用统计分析方法分析了气温升高对东北春小麦发育速度及产量的影响。

冬小麦;

采用开顶式气室研究高温对冬小麦产量的影响。开顶式气室为八边形结构, 高 2.4 m, 每边长 1.15 m, 以无色玻璃为室壁, 顶端开口, 以轴流风机送气, 室内温度在冬小麦生育期间平均比室外高 1℃ 左右, 冬小麦在拔节后移入气室至成熟。以室外 (自然环境) 为对照和统计分析方法及 CERES 模式模拟高温对冬小麦生长发育及产量的影响。

3 结果分析

3.1 温度升高对春小麦生长发育及产量的影响

3.1.1 温度升高对发育速度的影响

(1) 东北地区: 春小麦全生育期分为 5 个发育时段, 即: 播种—出苗, 出苗—分蘖, 分蘖—拔节, 拔节—抽穗, 抽穗—成熟。气温升高 5 个发育阶段的历程均呈缩短 (与目前相比) 的趋势。在降水不变 (下同) 时, 温度每升高 1℃, 从播种—出苗发育速度加快 11.13%, 出苗—分蘖加快 1.69%, 分蘖—拔节加快 3.45%, 拔节—抽穗加快 10.8%, 抽穗—成熟加快 4.15%, 其中播种—出苗、拔节—抽穗变化最大在 10% 以上。从全生育期来看, 气温升高 1℃, 全生育期缩短 5.3 天^[2]。

(2) 宁夏试验区: 从永宁和固原的试验资料来看, 也有相同的变化趋势, 而且有雨养农业区变化大于灌溉农业区的特点。气温升高 1℃, 永宁生育期缩短 8 天, 固原缩短 10 天^[3]。图 1 和图 2 分别给出了温度升高对永宁和固原春小麦各发育历期的影响。由图可见, 气温升高各发育阶段均呈缩短的趋势, 从三叶后变化增大。

3.1.2 温度升高对产量的影响

(1) 东北地区: 气温升高 1℃ (在水分不变时, 下同), 相对于 80 年代平均产量, 春小麦的气象产量将减少 2.8%。

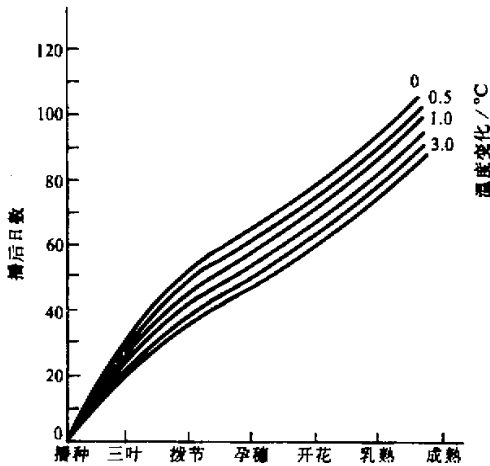


图 1 温度变化对永宁春小麦发育历期的影响

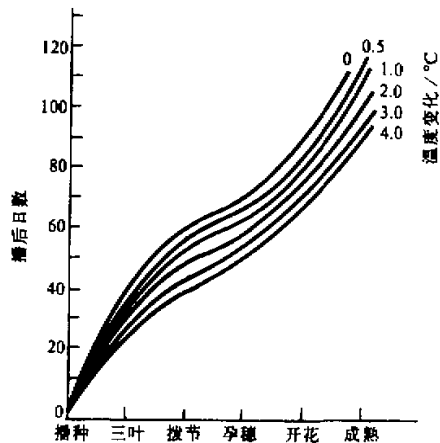


图 2 温度变化对固原春小麦发育历期的影响

(2) 宁夏试验区:表 1 为温度上升对春小麦产量的影响。由表 1 可见,温度升高对试区春小麦产量的影响是负效应。永宁第 1 播期(A₁)与第 4 播期(A₄)生育期平均温度相差 4.7℃,产量减少 36%,A₂比 A₁温度高 1.8℃,减产 8%,。雨养区的固原变化更大,A₂比 A₁温度高 1.4℃,减产 16%,A₄比 A₁高 4.2℃,减产 49%。

采用客土盆栽的试验消除了土壤的影响,也得到了相同的结果(表 2)。由表 2 可见,A₂、A₃期因温度高,无论客土还是本土都是减产,固原同一期(A₃)客土比本土减产更明显,原因是除了 A₁和 A₃期温度的差异外,永宁和固原两地的温度差平均为 2.4℃,所以在春小麦生育期内永宁温度比固原高,在此基础上再升温,高温的危害就更大了。

表 1 温度上升对产量的影响(大田试验结果)

	永 宁				固 原			
	A ₁ *	A ₂	A ₃	A ₄	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
产量/[kg/hm ²]	9018	8299.5	7972.5	5734.5	2601	2188.5	1842	1335
变化率/%**		-8	-12	-36		16	-30	49
温度/℃***	15.3	17.1	18.2	20.0	13.0	14.4	15.8	17.2

* 为适宜播期; ** 与 A₁期相比; *** 为全生育期平均气温

表 2 温度上升对产量的影响(客土盆栽试验)

	固 原			永 宁		
	客土(永宁)			本土(固原)		
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
产量/[g/株]	271.35	228	221.4	252	/	220.2
变化率/%		-24.2	-27.9		/	-14.4

	永 宁			固 原		
	客土(固原)			本土(永宁)		
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
产量/[g/株]	632.4	563.25	536.7	954.45	818.85	627.15
变化率/%		-12.5	-17.8		16.5	-52.1

3.2 温度升高对冬小麦生长发育及产量的影响

3.2.1 温度升高对华北冬小麦发育历程及产量的影响

选取华北地区汾阳、运城、遵化、唐山、肥乡和容城 6 个站 1981~1989 年的冬小麦生育、考种资料及相应时段的气象资料,总共 51 个样本进行模拟分析,利用残差模拟法组建发育速度与气象条件的关系式。分析结果表明^[4],温度升高,发育历程缩短。把冬小麦全生育期分成 7 个时段:播种一出苗,出苗一分蘖,分蘖一越冬,越冬一返青,返青一拔节,拔节一抽穗,抽穗一成熟。温度增加 3℃(下同),播种一出苗的发育速度为 0.1482,发育历期为 7 天,比 80 年代平均减少 1 天;出苗一分蘖发育速度为 0.065,发育历期 15 天,减少 4 天;分蘖一越冬,当温度升高 1℃,发育速度为 0.0273,发育历期延长 10 天(当温度升高 3℃时,此时温度超过 7.3℃,越冬期将大大推迟,所以,讨论增温 3℃已经没有实际意义);越冬一返青温度升高 3℃时,发育速度为 0.0136,发育历期为 74 天,缩短了 15 天;返青一拔节发育速度为 0.0247,发育历期为 40 天,缩短 2 天;拔节一抽穗发育速度为 0.0523,发育历期缩短 1 天;抽穗一成熟发育速度为 0.0305,发育历期为 22 天,缩短 4 天。从全生育期来看,温度每变化 1℃、发育速度约变化 0.0001,发育历期变化 6~8 天。平均气温如果升高 3℃,则发育速度由 80 年代的 0.0038 上升到 0.0042,发育历期也由 80 年代的 263 天缩短到 238

天,缩短了 25 天。

3.2.2 对穗粒数和千粒重的影响

穗粒数和千粒重是组成冬小麦产量的主要要素。温度升高对穗粒数和千粒重的影响如何?通过分析穗粒数和千粒重与温度的关系得到:温度升高对穗粒数和千粒重均为正效应,随温度的升高穗粒数和千粒重均为增加的趋势(表 3)。由表 3 可见,温度升高 $\geq 1^{\circ}\text{C}$,千粒重比 80 年代增加 7%,升高 3°C ,增加 37.8%,由以上数据说明,温度升高对千粒重的影响是十分明显的。

表 3 温度升高对千粒重的影响

	80 年代平均	+1 $^{\circ}\text{C}$	+2 $^{\circ}\text{C}$	+3 $^{\circ}\text{C}$
千粒重 / g	35.60	38.12	42.54	49.05
增长率 / %		7	19.5	37.8

穗粒数随气温的升高有明显的增加,气温每增加 1°C ,平均穗粒数约为 26.85~26.96,比 80 年代增加 2.2 粒左右,气温升高 3°C 时,穗粒数为 32.22~32.32 粒,比 80 年代增加 7.6 粒左右,由此可见,气温越高,穗粒数也越多。因此,温度升高将有利于增加穗粒数。但因温度升高生育期缩短(干物质积累时间短),对产量的影响与千粒重、穗粒数增加均有一定的抵消作用。所以温度升高对华北冬小麦经济产量虽有一定的好处,但影响的幅度不大。通过 CERES 模拟结果也可以得到验证。

3.3 利用 CERES 小麦模式评估温度升高对冬小麦发育过程和产量结构的影响

3.3.1 温度升高对冬小麦发育过程的影响

冬小麦全生育期约 230~260 天。在生育过程中,如果某一发育期内温度升高(或降低),则通过这一发育期所需的日数一般会减少(或增加)。表 4 给出了 CERES 小麦模式模拟全生育期日平均温度升高 1°C 和 2°C 时,杨麦 4 号播种到开花,开花到成熟与初始状态的对比。由表 4 可见,温度升高后,冬小麦播种至开花、播种至成熟的日数均比初始条件下缩短,开花期和成熟期提前^[5]。温度每升高 1°C ,播种至开花的日子缩短 6~10 天。播种至成熟缩短 7~9 天,缩短日数与播种早晚和升温大小有关,播种越早,升温幅度越大,缩短的日数越多。温度升高后,除第 1 播期外,开花至成熟所需的日数缩短 1~2 天,但第 1 播期反而延长。这是温度变化对发育期间接影响的结果。

表 4 温度升高对冬小麦发育历期的影响

	播期	初始状况	+1 $^{\circ}\text{C}$	缩短	+2 $^{\circ}\text{C}$	缩短
播种—开花	1	174	164	10	152	22
	2	173	165	8	157	16
	3	170	163	7	157	16
	4	166	160	6	153	13
开花—成熟	1	37	39	-2	43	-6
	2	35	34	1	35	0
	3	34	33	1	32	2
	4	34	33	1	32	2
播种—成熟	1	211	203	8	195	16
	2	208	199	9	192	16
	3	204	196	8	189	15
	4	200	193	7	185	15

3.3.2 温度升高对冬小麦产量结构的影响

采用 CERES 小麦模式模拟温度升高对冬小麦产量结构(籽粒重、籽粒数)的影响。

图 3 为温度升高对籽粒重的影响。由图可见,温度升高使第 1、2 播期籽粒重增加,而第 3、4 播期籽粒重减少,并可看出,后期温度升高,不利千粒重增加。

图 4 为温度升高对籽粒数的影响,总的来看,温度升高籽粒数基本都有所增加,特别是播种较晚的,增加更多。这主要是由于温度升高改善了越冬条件,有利于冬小麦的分蘖成穗。

图 5 为温度升高对籽粒产量的影响,由图可见,温度升高基本有利于籽粒产量的提高,从播种早晚来看,第 1 播期(播种最早)影响最大,第 4 播期(播种最晚)影响最小,第 2、3 播期介于它们之间。温度升高有利于小麦籽粒产量的提高,主要是由于温

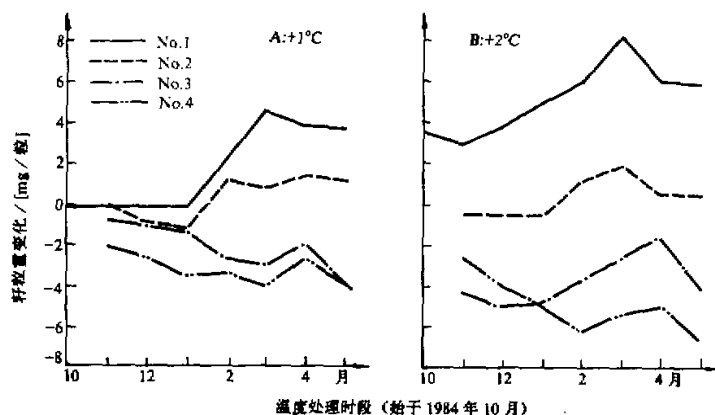


图 3 温度升高对籽粒重的影响

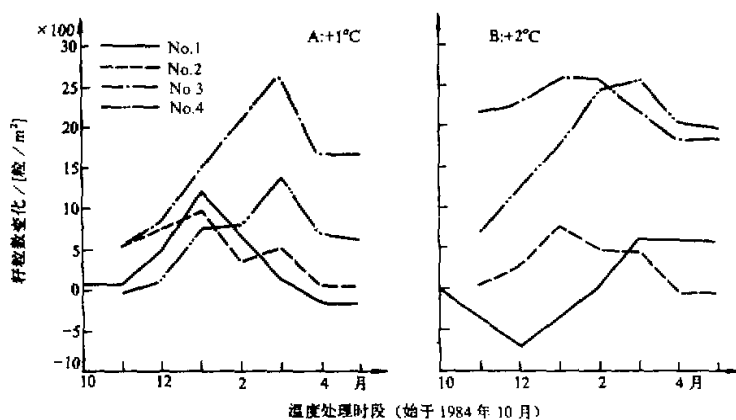


图 4 温度升高对籽粒数的影响

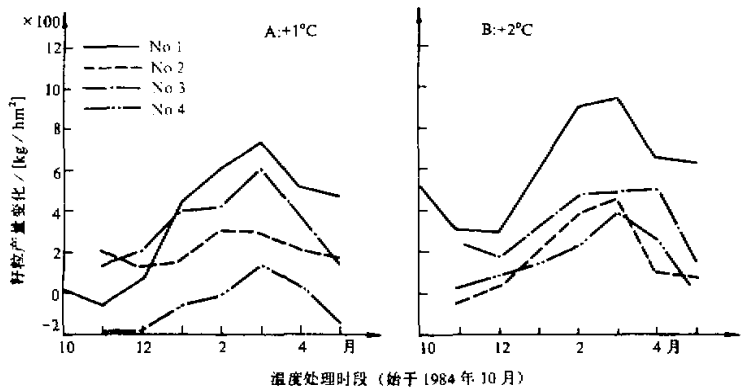


图 5 温度升高对籽粒产量的影响

度升高改善了小麦的越冬条件, 通过发育期提前, 也改善了籽粒灌浆期的条件。
CERES 模拟的结果表明, 温度升高可使小麦发育加快, 开花期提前, 生育期缩短, 温度升高有利于经济产量的提高, 但籽粒重和籽粒数的影响则有正有负。播种期不同, 温度升高对各要素的影响的大小也不同, 甚至影响的正负性质也会发生变化。可见在温度升高的条件下, 适当调整和改变作物的种植计划和耕作措施是十分必要的。

通过人工模拟试验表明, 京冬 6 号冬小麦, 采用盆栽, 每盆定植 9 株, 10 月 1 日播种, 次年 4 月 5 日 (拔节期) 移入气室, 结果 (表 5) 表明, 温度升高同样使冬小麦发育期缩短, 抽穗和开花期明显提前 (与上述分析吻合), 温度升高使每穗粒重增加, 千粒重相应减小 (10% 左右), 穗数和粒数也减少, 最终使籽粒产量下降 (16% 左右)。开顶式气室人工模拟温度升高对冬小麦的影响与用统计分析和 CERES 模式的分析有一致的地方, 也有不同的地方, 这是因为试验条件不同造成的。人工模拟是在拔节后升温的条件下进行的, 模式模拟是假定全生育期温度升高的条件下进行的, 但不管哪

表 5 “高温”对冬小麦发育后期的历期及产量结构的影响

项 目		处理 (气室内)	对照 (室外)
发 育 历 期	拔节	16 / 4	18 / 4
	孕穗	26 / 4	28 / 4
	抽穗	6 / 5	11 / 5
	开花	9 / 5	16 / 5
	乳熟	23 / 5	25 / 5
	成熟	1 / 6	4 / 6
平均每株穗数		3.18	3.88
平均每穗粒数		25.40	25.97
平均每穗粒重		1.134	1.097
千粒重		45.306	48.075
8 盆穗数		229	279
8 盆粒数		5816	7263
8 盆籽粒重 / g		259.728	306.089

种试验都说明升温对冬小麦生长发育及产量是有利的一面,也有不利的一面,后期升温对冬小麦是不利的。

4 小结

本文通过田间试验、统计模拟、CERES 模式的模拟分析了温度升高对小麦发育历期及产量结构的影响,得到了基本一致的结果。

(1) 温度升高加快了小麦的发育进程,缩短了发育历期。

(2) 温度升高对喜凉的春小麦籽粒产量为负效应,温度升高越多,籽粒产量下降越明显。

(3) 温度升高有利于冬小麦籽粒重和籽粒数的增加,但播期不同,温度变化对各要素影响的大小也不同,甚至影响的正负性质也会发生变化。

(4) 温度升高改善了越冬条件,基本上有利于冬小麦经济产量的提高。

(5) 温度升高 1°C , 冬小麦籽粒产量增加最多的第 1 播期也只有 $750\text{ kg}/\text{hm}^2$, 比 1990 年全国冬小麦平均产量 ($3285\text{ kg}/\text{hm}^2$) 也只增加了 23%。如把各时段增加率加以平均,也仅有 10.8%。如果再把春小麦的负效应考虑进去,温度升高对小麦经济产量的正效应就更小了。因此,我们认为温度升高对我国小麦产量的影响幅度不会太大。

参 考 文 献

- 1 马丁·帕里著,周克前译,1994,气候变化与世界农业,北京:气象出版社,102.
- 2 潘亚茹等,1991,中国气候变化对农业影响的试验与研究,北京:气象出版社,40~46.
- 3 Gao Suhua et al., 1993, Influences of climate change on dry material accumulating velocity of spring wheat and numerical simulation in arid and semi-arid regions, *Environmental Sciences*, 5, No.1, 45~52.
- 4 Gao Suhua et al., 1993, Impacts of climate change on wheat development and production in the northern China, *Environmental Sciences*, 5, No.2, 176~178.
- 5 赵四强、张宇, 1991, 中国气候变化对农业影响的试验与研究, 气象出版社, 北京, 91~95.

The Impacts of “Higher-Temperature” on Wheat Growth and Yield in China

Gao Suhua, Guo Jianping, Zhao Siqiang, Zhang Yu and Pan Yaru

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract Using field experiments, artificial chamber simulated experiments, historic data statistic analysis and CERES winter wheat models, the impacts of “higher-temperature” on both winter wheat and spring wheat development stage, production structure and economic yield are analysed. The results show that the wheat development period is shorten and the economic yield decreases as temperature raises. The increasement of temperature improves the overwinter condition for winter wheats which is favourable for ear grain numbers and grain yield. However the “higher-temperature” after turnngreen is unfavourable for winter wheat economic yield.

Key words wheat development production “higher-temperature” impact