第9卷3期
1998年8月

应用气象学报
QUARTERLY JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY

Vol. 9, No. 3
August 1998

气候变化对东北地区作物生产潜力影响的研究*

陈 峪 黄朝迎

(国家气候中心，北京 100081)

提 要

利用作物生长动态统计方法，计算和分析了5～9月气温和降水变化对东北地区水稻、玉米、大豆3种主要作物生产潜力的影响，建立了各站气温、降水与作物生产潜力的关系式，并用来评估气温和降水变化对当年作物产量的影响，还讨论了未来气候变化对东北地区作物生产潜力的可能影响.

关键词：气温变化 降水变化 作物生产潜力 敏感性试验

引 言

随着人口的日益增长和可耕地面积的不断减少，粮食供求矛盾已变得十分突出；如何尽可能地利用作物生产潜力，提高粮食产量，以满足更大需求，已成为人们普遍关注的问题. 关于作物生产潜力的计算方法、时空分布等已有不少研究. 但在社会发展和其它因素相对稳定的条件下，天气气候条件是影响作物生产潜力的重要因素. 气候变化(如气温、降水的变化)将对作物生产潜力产生怎样的影响，其波动范围有多大，以及在假定的未来气候变化的背景下，作物生产潜力将达到怎样的水平，这是本文的研究重点.

1 资料和方法

东北地区是国家重要的粮食生产基地，该地区气候要素变率较大，热量资源偏少且不稳定. 此外，各地之间气候要素差异也较大，如西部地区热量资源相对丰富，但降水不足，东部地区则降水比较丰沛，而热量条件又显不足. 气候的多变性对作物生产潜力的发挥有一定的制约作用. 本文选用黑龙江9个站、吉林6个站、辽宁7个站共22个站点的1961～1995年5～9月月平均气温及吉林、辽宁两省13个站的1971～1990年5～9月月降水量和月小型蒸发皿蒸发量资料(黑龙江省蒸发量资料缺)，利用作物生长动态统计方法[1]，并假定光合产量为一常数，按玉米、水稻、大豆3种作物，计算各站历年温度

* 本研究得到国家气候中心业务发展基金课题资助.
1997-02-03收到，1997-06-02收到修改稿.

订正函数、水分订正函数、光温产量和气候产量及其距平百分率.

温度订正函数的表达式为：

$$F(T) = [(T_i - T_1)(T_2 - T_i)^B]/[T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B]$$

$$B = (T_2 - T_0)/(T_0 - T_1) \tag{1}$$

式中：T_i 为 5～9 月月平均气温(℃)，T_0、T_1、T_2 分别为作物三基点温度(℃).

光温产量 Y_2 为：

$$Y_2 = Y_1 \times F(T) \tag{2}$$

式中：Y_1 为光合产量.

水分订正函数表达式为：

$$F(R) = 1 - (|\Delta W_j|/W_j) \times k \tag{3}$$

$$\Delta W_j = R_j - W_j$$

$$W_j = E_j \times \alpha_j$$

式中：R_j 为 5～9 月月降水量，W_j 为与 R_j 相应月份的作物理论需水量，α_j 为作物系数，E_j 为草地蒸发力，k 为与径流有关的参数(当 $\Delta W_j < 2$ mm 时，$k=1$；当 $\Delta W_j \geqslant 2$ mm 时，$k=W_j/R_j$).

气候产量 Y_3 为：

$$Y_3 = Y_2 \times F(R) \tag{4}$$

光温产量(即光温生产潜力)为水分条件基本满足的前提下，由自然光温条件决定的产量. 气候产量(即气候生产潜力)为温度和降水所决定的产量. 温度订正值(即温度适宜度)和水分订正值(水分适宜度)分别反映了热量和水分条件对作物的满足程度，且成正比，可用于定量评价作物整个生育期的气候适应性. 计算表明，温度适宜度距平百分率与光温产量距平百分率相同，水分适宜度距平百分率与气候产量距平百分率相差也不大，因此，气候变化对作物生产潜力的影响可通过适宜度的变化来体现.

2　气候变化对作物生产潜力的影响

2.1　温度变化的影响

(1) 年际变化的影响　计算结果表明，年际间温度的变化(用 5～9 月平均气温距平表示)可使温度适宜度产生相应波动(用温度适宜度距平百分率表示). 温度升高产生正效应，温度降低产生负效应(表1). 由表1可见，温度变化幅度相同(如距平为±1℃)，

表 1　温度变化 1 ℃时部分站点温度适宜度的变化

站名	TP(℃)	气温距平(℃)	温度适宜度变化(%)		
			玉米	水稻	大豆
呼玛	15.4	1	29.0	40.5	26.4
鸡西	17.6	1	13.1	16.4	11.0
延吉	17.8	1	11.0	13.8	8.8
大连	20.6	1	3.4	4.6	1.5
鸡西	17.6	−1	−12.2	−15.3	−10.5
延吉	17.8	−1	−10.3	−12.8	−8.1
长春	19.0	−1	−10.6	−12.9	−9.1

注：TP 为 5～9 月平均温度多年平均值.

对不同地区所产生的效应不同；而同一地区不同作物间比较，适宜度变化幅度也不同，以水稻变化幅度为最大，其次是玉米，大豆变化幅度最小.

(2) 生育期温度变化的影响　5～9 月为东北地区作物生长发育的主要时期. 虽然一些年份 5～9 月平均气温相同，但由于温度月际变化造成各月 $F(T)$不同，因而整个生育期 $F(T)$也可能不同，温度变化所产生的效应也不同，如表 2 所示. 例如伊春，1967 年和 1983 年 5～9 月平均温度同为 16.0℃，但因各月温度变化不同，$F(T)$不同. 以玉米为例，$F(T)$分别为 0.54 和 0.59，前者产生正效应，后者则产生负效应. 可见，尽管总热量条件相同，但因作物各个生育阶段的温度变化不同而产生了相反的效应.

表 2　部分站点 $F(T)$的月际变化(T：℃)

	伊春(TP=16.1℃)								大连(TP=20.6 ℃)							
	1967 年 $F(T)$				1983 年 $F(T)$				1979 年 $F(T)$				1990 年 $F(T)$			
月份	T	玉米	水稻	大豆	T	玉米	水稻	大豆	T	玉米	水稻	大豆	T	玉米	水稻	大豆
5	13.0	0.62	0.52	0.73	11.4	0.46	0.33	0.56	16.9	0.92	0.86	0.97	14.0	0.72	0.62	0.81
6	16.1	0.52	0.46	0.65	14.5	0.36	0.27	0.51	19.1	0.78	0.74	0.86	19.8	0.83	0.80	0.90
7	21.1	0.75	0.67	0.82	20.4	0.69	0.61	0.77	23.0	0.88	0.82	0.93	23.1	0.88	0.82	0.93
8	19.4	0.69	0.59	0.73	20.0	0.74	0.65	0.79	24.3	0.99	0.96	1.00	25.1	1.00	0.99	1.00
9	10.5	0.11	0.0	0.13	13.9	0.69	0.64	0.76	19.4	1.00	1.00	0.96	20.7	0.97	0.98	0.91
5～9 月平均	16.0	0.54	0.45	0.61	16.0	0.59	0.50	0.68	20.5	0.91	0.88	0.95	20.5	0.88	0.84	0.91
FTJ*		−3.9	−5.1	−3.6		4.7	5.9	6.5		1.3	1.6	1.5		−2.3	−2.5	−2.5

* FTJ 为 5～9 月 $F(T)$距平百分率(%).

(3) 空间变化的影响　东北地区的地理环境决定了其南北热量条件的明显差异，故不同地区由于其热量条件不同，温度变化引起的适宜度变化也不同. 温度变化 1℃，热量条件越差的地方(即 TP 越低)，适宜度变化幅度越大，对作物生产潜力的影响越大；热量条件越好的地方(TP 越高)，则相反. 适宜度变化的空间分布趋势为由南向北增大，同纬度相比较，东部大于西部，与该地区温度分布呈相反趋势. 以水稻为例，温度变化 +1℃，伊春(TP=16.1℃) FTJ 为 23.9%，虎林 (TP=17.3℃) FTJ 为 14.9%，哈尔滨(TP=18.5℃) FTJ 为 8.7%，丹东 (TP=19.7℃) FTJ 为 7.3%，大连(TP=20.6℃)FTJ 为 4.6%. 可见，随着 TP 的增高，FTJ 反而降低. 3 种作物中以水稻的空间变化幅度最大，其次为玉米，大豆变化幅度最小.

(4) 不同作物对温度变化的反应　将各站光温生产潜力距平百分率与 5～9 月平均温度距平进行相关分析，发现两者存在很好的线性相关，并达到显著水平(图 1). 以呼玛站代表热量条件差的地区(TP =15.4 ℃)，营口站为条件好的地区(TP =21.3 ℃)，吉林站代表热量条件适中的地区(TP =18.7 ℃)，其光温生产潜力距平百分率 Y 与 5～9 月平均气温距平 X 的一元回归方程系数和常数分别为：

呼玛水稻	34.549	−0.279	吉林水稻	11.302	0.164	营口水稻	4.5215	−0.0488
玉米	24.692	−0.2059	玉米	9.1527	0.13	玉米	3.2259	−0.0397
大豆	21.31	−0.1855	大豆	7.3517	0.1038	大豆	1.2381	−0.017

通过比较回归方程的系数可以看出温度变化幅度相同，不论该地区热量条件如何，3 种作物中均以水稻对温度变化最敏感，其次为玉米，大豆对温度变化的敏感性最小.

也就是说，温度变化对水稻的生产潜力影响最大，对大豆的生产潜力影响最小. 热量条件越差的地区作物对温度变化的反应较热量条件好的地区更为敏感.

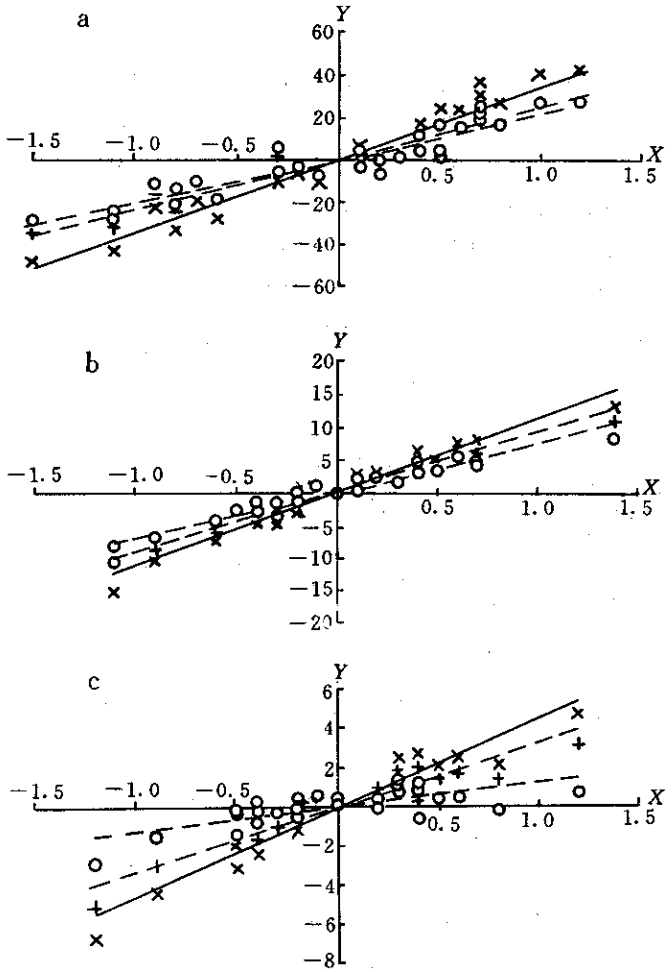

图 1　光温生产潜力距平百分率与 5～9 月平均气温距平相关图　(a) 呼玛　(b) 吉林　(c) 营口(×、+、○分别代表水稻、玉米、大豆)

2.2　降水变化的影响

(1) 年际变化的影响　降水变化对作物水分适宜度产生的效应，并非降水变率越大，效应越大. 由于 5～9 月降水量的年际差异较大，故水分适宜度及其距平百分率的年际变化也较大. 降水偏多的年份(5～9 月降水量距平百分率为正)产生的效应并不一定为正，而降水量偏少的年份，不一定产生负效应. 大致是降水量少的西部干旱地区，降水量偏多，一般为正效应；降水量偏少，一般为负效应. 降水量较多的东部湿润地区，降水偏多，一般为负效应；降水偏少，一般为正效应.

(2) 月际变化的影响　作物整个生育期降水量的月际变化，使得水分适宜度存在明显的月际差异，因此即使某些年份 5～9 月降水量基本相同，降水变化产生的效应也可能

不同，甚至可相差很大．以玉米为例，白城1973年和1974年5～9月降水量距平百分率分别为25.1%和25.9%，而产生的效应分别为1.7%和15.2%，相差9倍．沈阳1977年、1982年5～9月降水距平百分率分别为－18.4%和－18.8%，也很相近，但却产生了相反的效应．此外，造成这种差异的另一个原因是各种作物不同生育期的需水量不同，同一量值的降水量出现在不同月份，也可产生不同的效应．如白城，1973年5月和6月降水量分别为32 mm和31 mm，仅相差1 mm，而水分适宜度分别为0.54和0.19，相差近3倍．沈阳1977年8月降水量为86 mm，水分满足程度达84%，而1982年8月降水量达229 mm，水分满足程度仅59%．

(3) 空间变化的影响　计算结果表明，水分条件越差的地区（*RP*越小），降水变化对水分适宜度产生同步效应的机率越大，即降水偏多产生正效应，降水偏少产生负效应；水分条件越好的地区（*RP*越大），降水变化产生同步效应的机率越小．如白城，*RP*仅361.5 mm，降水变化产生同步效应的机率为90%；丹东，*RP*为755.7 mm，降水变化对水稻和大豆产生同步效应的机率仅为20%和15%，玉米为55%．说明在缺水地区，降水增多将对作物生产潜力产生正效应，而降水丰沛的地区，一般年份的水分条件能够满足作物生长需求，降水过多则有可能产生负效应．

(4) 不同作物对水分变化的反应　将作物气候生产潜力距平百分率与5～9月降水量距平百分率进行相关分析，结果表明两者之间存在较好的线性关系，达到显著水平（图略）．选取白城（$RP=361.5$ mm）代表水分条件差的地区，四平（$RP=524.9$ mm）代表水分条件适中的地区，丹东（$RP=755.7$ mm）代表水分条件好的地区．其气候生产潜力距平百分率Y与5～9月降水距平百分率X的一元回归方程系数和常数分别为：

白城			四平			丹东		
水稻	1.178	－0.0118	水稻	0.0598	0.0047	水稻	－0.4939	－0.0075
玉米	1.0022	－0.01	玉米	0.2621	－0.0037	玉米	0.0535	－0.0047
大豆	1.0077	－0.0151	大豆	－0.1735	0.0059	大豆	－0.683	－0.034

分析表明，由于各种作物生育期需水量不同，因此对水分变化的敏感程度也有所不同，但相差不大．对不同地区而言，同一种作物对水分变化的敏感性也不同．水分条件越差的地区，降水变化对水稻生产潜力的影响最大，其次是玉米和大豆；而水分条件越好的地区，降水变化对大豆的生产潜力影响最大，其次为水稻和玉米，且降水增多可能使大豆和水稻的生产潜力降低，降水减少反使其生产潜力提高；水分条件适中的地区，3种作物对水分变化的敏感性均不大．

2.3 气候变化对作物生产潜力影响的敏感性试验

(1) 温度变化的敏感性试验[2]　假定未来5～9月温度上升1℃、2℃、3℃，对作物生产潜力有何影响？我们将温度变化分别代入上述相关方程，得到不同温度变化情景下，呼玛、吉林和营口3地作物生产潜力的变化．结果表明　未来5～9月温度上升1℃，呼玛站水稻的光温生产潜力将提高34%，玉米为25%，大豆为21%；吉林站3种作物光温生产潜力将分别提高11%、9%和7%；营口站分别提高5%、3%、1%．可见，增温对水稻的生产最为有利，并且温度变化幅度越大，作物生产潜力增幅也越大，特别是对热量条件差的地区来说增幅更大，温度增加1℃可使作物生产潜力提高20%以上．此外，不

同作物间生产潜力变化幅度的差别也随着增温幅度的增大而增大，对不同地区的同一种作物来说也是如此.

(2) 降水变化的敏感性试验　假定未来5～9月降水量变化±10%、±20%，其对白城、四平和丹东3地作物气候生产潜力的影响如表3所示. 由表3可见，若未来气候趋于湿润，对干旱的西部地区(白城)作物生产是有利的，对多雨的东部地区(丹东)则不太有利；若未来气候趋于干燥，则对西部地区不利，而对东部地区比较有利. 气候条件比较适中的中部地区(四平)，不论降水增加还是减少，作物的生产潜力变化都不大.

表3　降水变化(*RJ*)对气候生产潜力的影响(%)

RJ	白城			四平			丹东		
	水稻	玉米	大豆	水稻	玉米	大豆	水稻	玉米	大豆
10%	11.8	10.0	10.1	0.6	2.6	−1.7	−4.9	0.5	−6.9
20%	23.5	20.0	20.1	1.2	5.2	−3.5	−9.9	1.1	−13.7
−10%	−11.8	−10.0	−10.1	−0.6	−2.6	1.7	4.9	−0.5	6.8
−20%	−23.6	−20.0	−20.2	−1.2	−5.2	3.5	9.9	−1.1	13.6

3　作物产量增减趋势的评估

利用上述5～9月气温和降水变化与作物生产潜力变化的关系式，计算了1996年东北三省玉米光温产量和气候产量的增减趋势(图2). 由图2可见，1996年东北地区温度变化对玉米生长是有利的，光温产量一般均为增加趋势，增幅最大的站为黑龙江的呼玛，达25%；减幅最大的是吉林通化，为6%. 降水变化对玉米气候产量的影响有利有弊，吉林中、西部气候产量为减产趋势，辽宁大部为增产趋势. 气候产量减幅最大的是辽宁阜新，达14%，增幅最大的是朝阳，为19%.

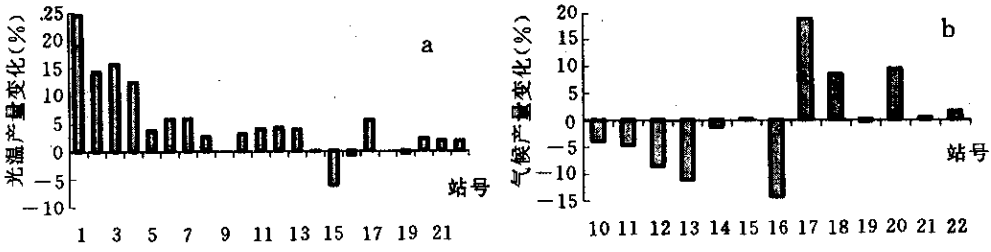

图2　(a) 黑龙江、吉林、辽宁部分站点光温产量增减幅度　(b) 吉林、辽宁部分站点气候产量增减幅度

(站号说明：1呼玛　2嫩江　3齐齐哈尔　4海伦　5伊春　6富锦　7哈尔滨　8鸡西　9虎林　10白城　11四平　12长春　13吉林　14延吉　15通化　16阜新　17朝阳　18锦州　19沈阳　20营口　21丹东　22大连)

本文对作物产量增减幅度所作的评估，是仅考虑气温和降水两个因子的变化对作物光温产量和气候产量所产生的影响进行评估，因计算所用关系式中只考虑了一个因子，故有其一定的局限性，但仍能反映出某年气温、降水条件对作物产量的影响程度.

4 结 论

(1) 气候变化可使作物生产潜力产生相应的变化，但对不同地区、不同作物所产生的效应不同.

(2) 温度升高，将使作物生产潜力提高，温度下降则作物生产潜力降低. 温度变化幅度越大，作物生产潜力变化幅度也越大. 在温度变率相同的情况下，热量条件越差的地区，作物生产潜力所受的影响越大；反之，影响越小. 温度变化对水稻的生产潜力影响最大.

(3) 降水变化对作物气候生产潜力的影响比较复杂. 一般来说，缺水地区，降水增多使作物生产潜力提高，降水减少使作物生产潜力降低，以水稻对水分变化最敏感. 而水分条件好的地区，则有所不同，降水增多作物生产潜力将有所下降，降水减少反而能使作物生产潜力提高，大豆对水分的变化最敏感. 气候条件适中的地区，降水变化对作物生产潜力的影响不明显.

(4) 若未来气候变暖，东北地区作物生产潜力将有不同程度提高，并对水稻生产最有利. 若未来气候趋于湿润，对干旱的西部地区作物生产有利. 若未来气候趋于干燥，对西部地区不利，而对多雨的东部地区比较有利.

(5) 利用气温和降水变化与作物生产潜力变化的关系式，可对每年气温、降水变化对作物产量的影响作出定量评估.

参 考 文 献

1 高素华主编. 中国三北地区农业气候生产潜力及开发利用对策研究. 北京：气象出版社，1995.
2 高素华，潘亚茹，郭建平. 气候变化对植物气候生产力的影响. 气象，1994，20(1)：30～33.

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CROP POTENTIAL PRODUCTIVITY IN NORTHEAST CHINA

Chen Yu Huang Chaoying
(*National Climate Center*, *Beijing* 100081)

Abstract

By using crop growth trends statistics model, the impacts of temperature and precipitation variations on the potential productivity of three main crops (rice, maize, soybean) in China from May to September are calculated and analysed, and the relationships between temperature, precipitation of each station and potential productivity are set up, respectively, which would be used to assess the impact of temperature and precipitation variations on crop yield of the same year, and the possible impact of future climate change on crop potential productivity in Northeast China.

Key words: Temperature variation Precipitation variation Crop potential productivity Sensitivity experiment