

东北地区作物冷害的研究*

孙玉亭 王书裕 杨永岐**

(黑龙江省气象科学研究所)(吉林省气象科学研究所)(辽宁省气象科学研究所)

提 要

本文分析了温度与粮食产量的关系,指出了作物遭到低温危害的原因、类型、指标及其地域分布规律。应用概率决策和线性规划的方法,提出了调整作物、品种布局和品种搭配等避免或减轻冷害的措施建议。

一、引 言

作物生育期间的低温,是影响东北地区粮食产量的主要农业气象灾害之一,近年来的几次严重冷害都造成了大幅度减产。因此,关于冷害的研究,引起了有关部门的重视。本文将阐明东北地区作物冷害的类型、指标和地域分布的特点,并引用概率决策和线性规划等数学方法,提出合理利用气候资源、避免或减轻冷害的措施。

二、作物冷害的类型和指标

作物产量的高低,是气象条件、土壤肥力和栽培技术水平以及社会经济因素等综合影响的结果。为了分析气象条件的影响,首先将历史产量资料(抄自三省统计局,下同)进行适当处理,去掉产量的时间趋势,假定这样做能基本上消除社会生产水平的影响,表示出气象产量。各地气象产量的年际变化,主要是由气象条件的年际波动引起的。东北区及其各省粮豆气象产量与生长季各月平均气温总和(T_{5-9})的相关系数如表1。表中的相关

表1 气象产量与 T_{5-9} 的相关系数

地 区	东 北 区	辽 宁 省	吉 林 省	黑 龙 江 省
相 关 系 数	0.6742**	0.4628*	0.7155**	0.5995**
资 料 年 代	1951—76	1951—75	1951—76	1951—75

* 为 5%水准下显著; ** 为 1%水准下显著。

* 本文于 1980 年 9 月 11 日收到,1982 年 5 月 28 日收到修改稿。

** 参加此项工作的还有冯国清、唐斐然、杨继武、刘庆敏、关桂林、兰鸿第。

系数都呈显著的正相关说明,气象产量与 T_{5-9} 的年际变化趋势基本一致,生长季温度高的年份产量较高,反之则产量较低。因此,各地 T_{5-9} 的年际差异,可以作为某一年作物能否因冷害减产的指标。

作物冷害的类型,可分为延迟型和障碍型。障碍型冷害只危害水稻(近年在高粱栽培中也有发现),所以对水稻来说还有二者兼发的混合型。延迟型冷害危害作物广,解放以来引起全区性粮豆大幅度减产的年份,都是延迟型冷害或混合型冷害,因此可以认为本区冷害类型以延迟型为主。据丁士晟等分析^[1-2],各主要作物之间相比较,冷害年减产最严重的是水稻,其次高粱,再次为玉米、大豆,以谷子最轻。

延迟型冷害,一方面引起作物分蘖减少、叶面积增长慢,降低群体生产能力,另一方面又延迟发育期,致使作物不能在秋霜前正常成熟,粒重降低。为了确定延迟型冷害的指标,分析了低温年减产程度与生长期月平均气温总和距平值(ΔT_{5-9})之间的关系,如图1所示。由图可见,在相同的 ΔT_{5-9} 负距平情况下,随着不同地方 \bar{T}_{5-9} 的高低,其减产的程度是不同的,即 \bar{T}_{5-9} 高的地方可比低的地方减产较少。因此,不能用统一的 ΔT_{5-9} 作全区的延迟型冷害指标,而应随着 \bar{T}_{5-9} 水平的不同而改变。由图1得到延迟型冷害的指标列于表2。

表2 粮豆作物延迟型冷害指标 (°C)

\bar{T}_{5-9}		80.0	85.0	90.0	95.0	100.0	105.0
ΔT_{5-9}	冷 害	-1.1	-1.4	-1.7	-2.0	-2.2	-2.3
	严重冷害	-1.7	-2.4	-3.1	-3.7	-4.1	-4.4

水稻的障碍型冷害,是在从幼穗形成到开花期间,遇有时间短暂、下降急剧的低温,直接危害生殖器官,引起不能正常结实而减产。低温引起不孕有两个最敏感时期,一是幼穗分化的小孢子时期和花粉母细胞减数分裂期,另一个是开花期。所以,水稻的障碍型冷害,又可分为孕穗期冷害和花期冷害两种类型。根据我们进行的盆栽试验、小区试验和障碍型冷害发生年其分布界限的考察(未发表)结果,确定的水稻障碍型冷害指标为:孕穗期遇连续2天以上日平均气温 $\leq 17^{\circ}\text{C}$,花期遇连续2天以上日平均气温 $\leq 19^{\circ}\text{C}$,作为障碍型冷害年。应该说明,因品种抗低温能力不同、因低温的前期条件或持续时间长短不同,水稻障碍型冷害的指标,应该是有差别的,我们使用上述统一而较粗略的指标,是为了分析方便,特别是便于比较不同地方发生频率之差异。

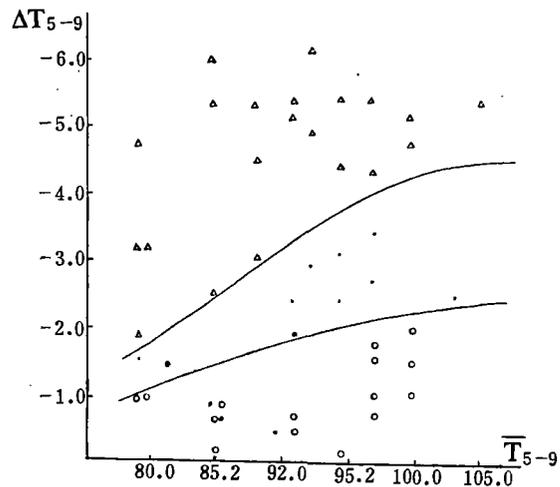


图1 ΔT_{5-9} 与减产程度的关系

(Δ 严重减产, \bullet 减产, \circ 平产或增产)

三、低温冷害的地域分布及历史演变

1. 延迟型冷害的分布

根据前述延迟型冷害的指标,使用区内 70 个站 1978 年前的生育期气温资料,计算了各地延迟型冷害的发生频率,其分布如图 2 所示。由图可见,冷害的频率,以辽宁南部近海地区为最低,在 15% 以下;其次是辽宁和吉林省的中西部地区,频率为 15—20%;冷害频

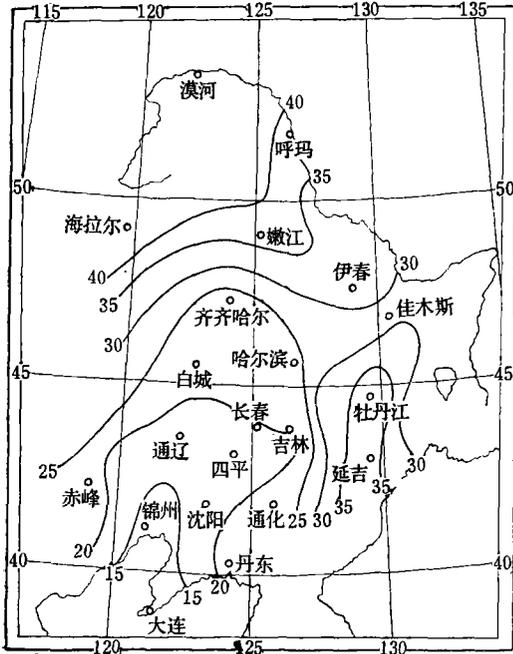


图 2 延迟型冷害频率(%)分布图

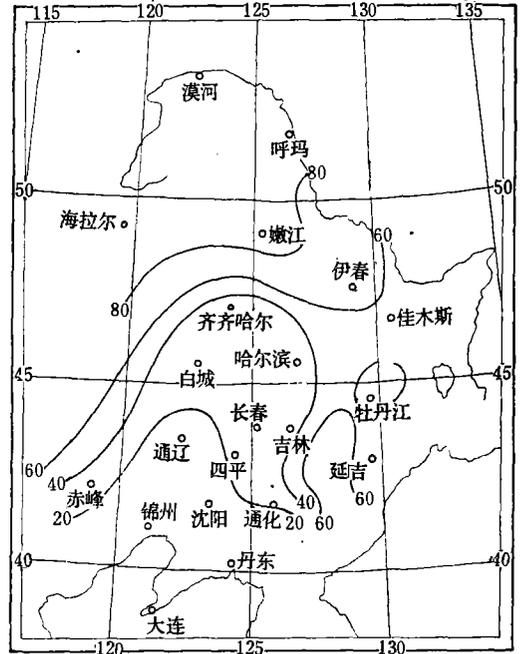


图 3 水稻障碍型冷害频率(%)分布图

率最高的是长白山地、大小兴安岭山地和蒙古高原的东部,在 30% 以上,其余地方在 20—30% 之间。大幅度减产的严重冷害年的频率,也有相似的分布趋势(图略):全区大部分平原地区为 20% 以下,辽吉二省的中西部平原低于 10%,长白山地和大小兴安岭山地在 25% 以上,蒙古高原的东部超过 30%。总之,冷害的频率,北部高于南部,山区高于平原。

2. 水稻障碍型冷害的分布

根据前述的水稻障碍型冷害指标,使用区内 70 个站 1978 年以前的逐日气温资料,计算了保证水稻在安全出穗期^[3]内出穗的前提下,孕穗期和花期障碍型冷害的发生频率。如果,不管孕穗期或花期,还是二期均出现障碍型冷害,就作为障碍型冷害年进行计算,则其发生频率分布状况如图 3。图中,辽宁全省和吉林省的西部频率最低,在 20% 以下;长白山地、大小兴安岭山区和蒙古高原的东部频率最高,为 60% 以上;松嫩平原和吉林省中东部半山区,频率为 20—40%;三江平原和吉林省的延边地区为 40—60%。单独计算的孕穗期和花期障碍型冷害频率,也有相似的分布趋势(图略),但花期的频率要高于孕穗期,而

且辽宁省和吉林省的中西部,基本没有孕穗期冷害。

应该指出:(1) 上述障碍型冷害的频率,是以保证在安全抽穗期内出穗的假定条件下的计算结果,而实际生产中,有时因遇到前期低温、选用品种不当或插秧过晚,会导致抽穗期延迟。经典型分析,在公主岭和延吉,如果在安全抽穗日以后3天出穗,障碍型冷害频率分别增高11.5%和7.7%;若晚6天出穗,则分别增高20.7%和11.5%。(2) 在延迟型冷害年里,常伴随着障碍型冷害出现,而且其同年发生而成混合型的频率与各地 T_{5-9} 呈显著负相关(相关系数-0.8111,信度0.001)。经计算,在 $\bar{T}_{5-9} < 88.7^{\circ}\text{C}$ 的地区,混合型冷害占低温年的73%以上;而 $\bar{T}_{5-9} \geq 88.7^{\circ}\text{C}$ 地区,则为27%以下。因此,本区水稻障碍型冷害与延迟型冷害有着密切的联系,水稻大幅度减产的年份,往往因延迟出穗而引起障碍型冷害,结果因混合型冷害的出现而加剧了危害,特别是生育期温度较低的地方,出现机率更多。所以,采用适宜本地气候条件的品种、壮苗早栽,促使水稻在安全出穗期内抽穗,无论对于障碍型还是延迟型冷害,都是降低其发生频率、减轻其危害的有效措施。

3. 冷害随长期气候波动的变化

分析东北区作物生育期气温的长期波动表明, T_{5-9} 存在着冷期与暖期交替出现的现象。近百年来,从上一世纪八十年代中期到本世纪初,为一个气温较低的冷期;其后,到五十年代初为止出现了一个气温较高的暖期;近年来的又一个冷期,已经持续了二十多年。经统计检验,冷暖期的差异十分显著。因此,冷暖期里作物冷害的机率也有显著的差别。表3列出了四个地方冷暖期的冷害频率,完全证实了这一点。由此可见,为了减轻冷害威胁和充分合理地利用气候资源,应该考虑冷暖期的差别,在作物或品种布局以及栽培技术等方面,作适当的调整。

表3 冷期与暖期的冷害频率(%) (括号内为资料年代)

冷暖期	营 口 (1905—1978)		沈 阳 (1906—1978)		长 春 (1909—1918)		哈 尔 滨 (1909—1918)	
	冷害	严重冷害	冷害	严重冷害	冷害	严重冷害	冷害	严重冷害
第一冷期(1918年前)	46.2	23.1	53.8	15.4	70.0	30.0	60.0	40.0
暖 期(1919—1952)	2.9	0.0	5.9	0.0	5.9	0.0	5.9	0.0
第二冷期(1953—1978)	15.4	11.5	19.2	11.5	29.6	18.1%	26.9	11.5

为了说明每年生育期气温在区内的分布,我们采用计算欧氏距离的方法,进行了气温分布型的客观分类。欧氏距离的计算式为:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{iK} - x_{jK})^2 / m}$$

式中, i 为型号, j 为年号, K 为站号, m 为站数, x 为5—9月距平和。分类结果,其中低温年有四种主要类型:特冷型和偏冷型——全区性的低温;北冷型——北部地区低温而南部正常,与此相反的为南冷型。1951—1978年间,特冷型有5年,偏冷型3年,北冷型3年,没出现南冷型。这一分型结果,实际上就是作物冷害在某一年里的地域分布状况。因

此,在作物品种布局和指导农业生产以及农业气象服务等工作中,要考虑到当年作物冷害在区内分布上的特点,特别是在南北差异显著的年份更加重要。

四、合理利用气候资源,抗御低温冷害

造成冷害减产的原因,一方面是气温本身的波动,另一原因是没有根据当地气候资源来合理布局作物和品种,盲目引种、改制。因此,根据地区气候条件合理安排作物和品种,是抗御冷害的一个重要措施,这已在近几年的实践中证明是有效的。

1. 品种的合理布局

采用 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的积温($\Sigma T_{>10}$)作为作物对温度要求的指标,并以此来衡量地区温度条件的满足程度。本区作物的极晚熟品种需 $\Sigma T_{>10} \geq 3000^{\circ}\text{C}$,晚熟品种 $2800-3000^{\circ}\text{C}$,中晚熟品种 $2600-2800^{\circ}\text{C}$,中熟品种 $2400-2600^{\circ}\text{C}$,早熟品种 $2200-2400^{\circ}\text{C}$,极早熟品种 $< 2000^{\circ}\text{C}$ 。根据作物品种的需要和地区 $\Sigma T_{>10}$ 的分布,采用“概率决策”方法确定选择的品种类型,建立收益矩阵 A :

		积 温 距 平				期 望 值
		y_1	y_2	y_3, \dots, y_j	P	
策 略 行 动	s_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}, \dots, a_{1j}	P_1	
	s_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}, \dots, a_{2j}	P_2	
	s_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}, \dots, a_{3j}	P_3	
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
	s_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}, \dots, a_{ij}	P_i	
气候概率 q		q_1	q_2	q_3, \dots, q_j		

该收益矩阵中:

y_j : 积温距平值, $j=1, 2, 3, \dots, m$;

S_i : 策略行动——品种类型, $i=1, 2, 3, \dots, n$;

a_{ij} : 不同温度条件采用不同品种的收益值;

q_j : 不同积温等级(距平)的气候概率。

一定气候概率下采用第 i 种决策的收益函数的期望值为:

$$P_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot q_j,$$

取 P_i 的最大值对应的决策就是选择品种的最优决策。

(1) 行向量的计算:延迟型冷害造成减产的最终表现是籽粒没有完成正常灌浆过程,千粒重下降。所以,灌浆过程进展程度,反映了成熟度的差别,即减产程度。图4给出了积温的相对变化与减产率的关系。图中 T_{\max} 为作物播种到成熟所需积温, ΔT 为播种到收获(取样)的积温与 T_{\max} 之差, y_{\max} 为成熟粒重, Δy 为取样时粒重与成熟粒重之差。不同作物和品种的灌浆曲线可用一组logistic曲线来描述。根据这个曲线就可求出积温

每变化 100°C 而引起的产量增减数值, 即收益矩阵 A 的行向量。

- (2) 列向量的求算: 在水分条件基本满足的情况下, 地区间常年产量的差异, 可以看作由于温度条件所限定的品种的产量差。地区产量与积温的关系可表示为:

$$y_i = a_0 + b_i \sum T_{>10}$$

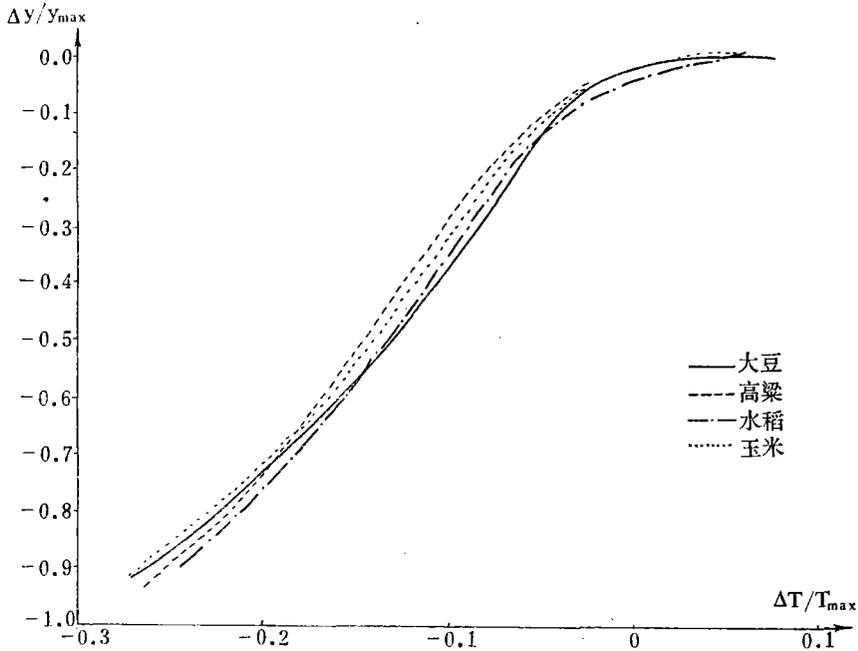


图 4 不同作物籽粒灌浆曲线

式中 y_i 为某一积温和水分条件下的气候产量, $\sum T_{>10}$ 为平均积温, a_0 为常数, b_i 为水分对产量的影响系数^[4], 可以看作是地区干燥度 K 的函数, 即 $b_i = f(K)$, $K = 0.16 \sum T_{>10} / r$ (r 为降水量)。在一定的水分条件下, b_i 是正常的, 根据品种需要的积温, 即可求出品种间积温每变化 100°C 而引起的产量增减值, 即列向量:

$$\frac{y_2 - y_1}{y_2} = \frac{b_i (\sum T_2 - \sum T_1) \times 10^{-3}}{b_i (\sum T_1) \times 10^{-3} + a_0}$$

表 4 积温每变化 100 °C 产量的增减幅度

积 温		3000	2900	2800	2700	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000
减产百分率	玉 米	$K=0.6$	6	6	7	7	8	8	10	10	10	11
		$K=0.8$	6	7	7	8	8	9	10	11	13	14
		$K=1.0$	7	8	8	9	10	11	12	14	16	20
	大 豆	$K=0.6$	6	6	6	7	7	8	8	9	10	11
		$K=0.8$	6	6	6	7	7	8	8	9	10	11
		$K=1.0$	6	7	7	8	9	9	10	11	13	15

根据上面求得的行向量与列向量值,即可求出收益函数的期望值。表 5 列出了 $\sum T_{>10}$ 为 2700°C , $K=1.0$ 时玉米的收益矩阵。由期望值可以看出,该地应选用需积温 2600°C 的玉米品种。

表 5 $\sum T_{>10}=2700^{\circ}\text{C}$, $K=1$ 时玉米的收益矩阵

$K=1.0$		积 温 状 况 (距平)					期望值(Pa)
		$>+100$	$100-0$	$0--100$	$-100\sim-200$	$-200--300$	
品 种 所 需 积 温	2800	100	90	78*	65*	53*	52.8
	2700	92	92	81	68*	59*	67.6
	2600	83	83	83	71	59*	73.7
	2500	73	73	73	73	61	71.9
	2400	62	62	62	62	62	62.0
气候概率 q		33	22	21	15	9	

* 考虑到商品价值,把千粒重降低 20%以上作为无效收益,取值 0。

2. 合理搭配品种

作物的不同品种类型,不但产量差异很大,而且稳产程度也不一致。以早熟种最稳、晚熟种最不稳。而在满足其温度需要的条件下,可能获得的最高产量从晚熟种最高,早熟种最低,这就出现了高产与稳产的矛盾。同时,生产实践中,播种或插秧都需要一段时间,势必会出现早播、早插的积温较充裕,而晚播晚插的则可能积温不足。因此,每个地方不可能只种一个品种。这些,就是品种搭配所要解决的问题。

品种搭配的策略行动用矩阵 C 表示:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \cdots c_{1i} \\ c_{21} & c_{22} \cdots c_{2i} \\ \vdots & \vdots \\ c_{k1} & c_{k2} \cdots c_{ki} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} i=1,2,3 \cdots n \text{ 为品种类型代号;} \\ k=1,2,3 \cdots l \text{ 为每个品种类型采用的策略行动代号。} \end{array}$$

由于每个地区搭配的品种类型不能太多,且生产中每个品种的播种面积的精度无需要求过高,因此策略行动的矩阵采用等步长组合(以百分数表示,步长为 10%),满足条件

$\sum_{i=1}^n C_{ki} \leq 100$ 对应的收益矩阵 B 可写成:

$$B = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \cdots c_{1i} \\ c_{21} & c_{22} \cdots c_{2i} \\ \vdots & \vdots \\ c_{k1} & c_{k2} \cdots c_{ki} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \cdots a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} \cdots a_{2j} \\ \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} \cdots a_{ij} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} \cdots b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} \cdots b_{2j} \\ \vdots & \vdots \\ b_{k1} & b_{k2} \cdots b_{kj} \end{vmatrix}$$

即品种布局收益矩阵 A 与 C 矩阵的乘积。求其收益函数的期望值为:

$$P = \sum_{j=1}^m b_{kj} P_j$$

计算结果,品种的搭配:种 70—80%的本地适宜的主栽品种(所需积温比本地平均积温少 100°C 的品种),搭配 20—30%的早熟品种(比本地积温少 200°C 的品种),能获得常

年较高的产量,且冷害年产量也较稳定。

3. 根据气候条件合理调整作物布局

调整作物布局,即衡量一个地区气候条件对作物的适宜程度,是以气候产量水平的高低及其稳产程度为标准,一方面对同一作物在不同地区所表现的经济性能进行比较,另一方面要对同一地区不同作物进行比较。

根据文献[5],气候产量可表示为:

$$y_i = k_m \frac{\sum Q \eta}{q} f(K)$$

式中: y_i 为气候可能产量, $\sum Q$ 为生长季生理有效辐射, η 为光能利用系数, q 为单位干物质发热量, k_m 为经济产量系数, $f(K)$ 为水分对气候产量的影响系数。取气候产量的相对值,称为气候生产力指标:

$$B_{i,j} = y_{i,j} / \bar{y}_i, \quad \bar{y}_i = \sum_{j=1}^n y_{i,j} \quad i=1, 2, \dots, m$$

式中 n 为站点数, i 为作物种类代号。计算不同作物间 $B_{i,j}/B_{k,j}$ ($k \neq i$) 值,若 $B_{i,j}/B_{k,j} > 1$, 说明该区气候条件对第 i 种作物有利,否则对第 k 种作物有利。再参照产量变异系数^[6], 就可以确定各种作物的主栽区。产量变异系数 C_j 用下式计算:

$$C_j = \frac{1}{\bar{x}_j} \sqrt{\frac{\sum (x_{j,i} - \bar{x}_j)^2 - \sum (\hat{x}_{j,i} - \bar{x}_j)^2}{n-1}}$$

$j=1, 2, 3, \dots, m$ 为地区号;

$i=1, 2, 3, \dots, n$ 为年代号;

式中 $x_{j,i}$ 为历年实际产量; \bar{x}_j 为历年平均产量; $\hat{x}_{j,i}$ 为由技术条件所决定的趋势产量,本研究采用五年滑动平均滤波确定趋势产量。

调整作物布局,我们是希望得出即能获得最高产量又获取最大经济收益的作物最优配置比例,但产量最高和产值最大并非一致。因此,我们把产值最大作为目标,而把产量不低于目前的生产水平作为限制条件,用线性规划的方法求解最优配置比例,即

$$\text{目标函数为 } \sum_{i=1}^n C_i X_i A_i = \max$$

$$\text{约束条件为 } \sum_{i=1}^n C_i X_i \geq \sum_{i=1}^n C_i Y_i$$

$$\sum X_i \leq 100$$

$$X_i \geq 0$$

式中 C_i 为各种作物气候可能产量; X_i ——各种作物播种面积比例; Y_i ——各种作物的实际面积比例; A_i 为各种作物的单价。

为突出气候条件的影响,不加更多的农业限制,采用等步长试验迭代求解。计算了黑龙江省玉米、大豆、小麦等作物的最优配置比例,结果是:在小麦主栽区,小麦面积要超过 50%,而玉米的面积不能超过 10—20%,大豆要占 30%左右;在大豆主栽区,大豆的面积要保持 30—40%,玉米占 30%左右,而小麦下降到 20—30%;在玉米主栽区,玉米面积要超过 50%,尤其干旱地区甚至可达 70%以上,而大豆、小麦要下降到 10—20%。

参 考 文 献

- [1] 丁士晟, 东北地区夏季低温的气候分析及其对农业生产的影响, 气象学报, 38 卷第 3 期, 1980。
[2] 王书裕, 吉林省的冷害及其分布, 气象科技资料, 1975 年第 8 期。
[3] 王书裕, 东北地区水稻的农业气候生态, 农业气象, 1981 年第 2 期。
[4] 孙玉亭, 黑龙江省玉米农业气候区划, 农业气象, 1980 年第一期。
[5] Тоомина, X. Г, П. X. Карина, Агроклиматическая оценка потенциального урожая многолетних трав и недобора урожая, обусловленного дефицитом влаги. Метеорология и гидрология, 1977, 2.
[6] Мельник, Ю. С, Изменчивость урожая подсолнечника в зависимости от условий погоды. Метеорология и гидрология. 1975. 6.

STUDIES ON COOL SUMMER AND CROP YIELD IN NORTHEAST CHINA

Sun Yuting

(Heilongjiang Institute of Meteorological Science)

Wang Shuyu

(Jilin Institute of Meteorological Science)

Yang Yongqi

(Liaoning Institute of Meteorological Science)

Abstract

In this paper the relationship between the temperature and crop yield was analysed and the causes, types, indexes and distribution of low temperature damage on crops were noted. By use the methods of statistical decision and linear programming, suggestions concerning adjustments of crop-variety distribution and variety ratio for avoiding and reducing the cool summer disasters were made.