

陕西汉中盆地水稻冷害初探*

许尊伍

(陕西省气象科学研究所)

提 要

本文采用“多重比较”检验、方差分析和回归积分方法,求算了水稻冷害的温度指标,确立了产量预报的积分经验公式和温度影响产量的时间函数 $a_i(t)$,从而揭示了水稻产量和温度分布状况的定量关系,为稳产高产提供依据。

一、前 言

水稻冷害无论在温带或亚热带都普遍存在着。近三十年来,日本对水稻冷害的基础研究作了大量的试验研究工作。国内近些年来,对其指标,影响规律、预报等作了广泛地探索。汉中盆地是我省水稻的主产区,由于冷害的存在,年际产量不稳、波动大。本文利用定花观测资料,依据“多重比较”检验,对水稻冷害指标进行了求算,同时,着力于全生育期温度的分布与产量形成关系的研究,可望得到定量的结果。

二、资料处理方法

本文采用的方法主要是“多重比较”检验、方差分析和回归积分。后两个方法是以产量作为基本依据的。作物产量是农业技术措施、生产力水平和气象因子综合作用的结果。对于一个较大的农业区来说,基本的自然状况,如土壤、地形、作物种类等,20多年来基本上变化不大,而随着农业生产水平的提高,产量呈上升趋势,同时又表现出随机波动。上升趋势反映了生产力水平等因素的总效果,随机波动反映了气象因子的影响。因而,在作物产量 y_i 中,应去掉趋势项,得到气候产量 y_{ei} ,进而研究 y_{ei} 与气象因子的关系。这一观点是由日本学者松田昭美提出的^[1]。近几年来,在国内已有应用。根据这一观点,采用以下处理方法:

若以 $f(i)$ 表示一个地区作物的时间趋势产量,则气候产量可依据下式:

$$y_{ei} = y_i - f(i) \quad (1)$$

得到,式中 i 为年序号, $f(i)$ 通常用正交多项式拟合历年产量得出。

三、冷害温度指标的求算

水稻生育后期遇到低温,产生空粒,显著影响结实率和产量。深入研究低温对水稻结实率的影响,确定它们之间的关系,这对于拟定一个地区水稻的安全齐穗期,栽培上如何

* 本文于1979年9月25日收到,1981年元月29日收到修改稿。

采取措施,减少低温的影响,提高结实率有一定的指导意义。

水稻在抽穗开花阶段遇到异常低温造成空粒率增加的过程是比较复杂的,除了与低温的强度、持续时间有关外,还与当时稻株所处的具体发育时段等因素有关。据研究认为^[2-3],花粉形成期为露穗后 1—2 天,盛花期为露穗后 3 天,胚和胚乳的形成是受精后 1—3 天。在这几个时段中,以盛花期受低温的影响最显著。因此,作者将收集的 1968, 1972 和 1976 年的定花观测资料以及我所与汉中农科所以往的冷害试验资料按持续 3 天(盛花期前 1 天至盛花期后 1 天)进行整理,并按温度进行分档(17°C—22°C),采用“多重比较”检验方法求算了水稻冷害的温度指标。

“多重比较”检验是由 Tukey 提出的^[4]。这个方法是先将某要素(如温度等)分成不同的水平,在方差检验显著的前提下,进一步作多重比较,得出差异显著的临界值。

他提出以公式

$$d_T = q_\alpha(m, f, \gamma) \sqrt{\frac{S_e}{\gamma}} \quad (2)$$

作为判断水平间是否显著的尺度。式中 q 可由 q 表查出, d 为信度, m 为水平个数, f 为试验误差自由度, γ 为试验重复次数, $\overline{S_e}$ 为试验误差的均方。

在比较相邻水平之间的差异时:

当 $d_{i,j} \leq d_T$ 时, i 水平与 j 水平差异不显著;

当 $d_{i,j} > d_T$ 时, i 水平与 j 水平差异显著。

其中

$$d_{i,j} = |k_i - k_j| \quad (3)$$

式中 k_i 与 k_j 为不同水平下,某要素的平均值。

若将 m 个水平分为 m_1 与 m_2 两部分,需比较这两部分的差异时:

当 $\left| \sum_{i=1}^m C_i k_i \right| \leq \frac{1}{2} d_T \sum_{i=1}^m |C_i|$ 时, m_1 与 m_2 差异不显著;

当 $\left| \sum_{i=1}^m C_i k_i \right| > \frac{1}{2} d_T \sum_{i=1}^m |C_i|$ 时, m_1 与 m_2 差异显著,进而可找出差异显著的临界值。

其中, C_i 是一组常数,满足

$$\sum_{i=1}^m C_i = 0 \quad (4)$$

经检验得到图 1:

由图 1 可见,当气温在 19°C 以上时, $d_{i,j}$ 在 d_T 等值线以下,当气温在 19°C 以下时(包

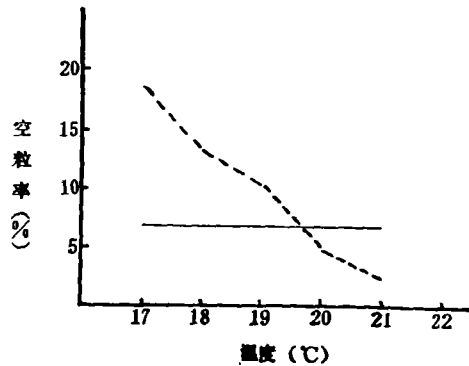


图 1 温度 T 等间隔变化时, $d_{i,j}$ 变化趋势(虚线 $d_{i,j}$, 实线 d_T)

括 19°C), d_{i_s} 在 d_T 等值线以上。因此, 可将等于 19°C (或小于 20°C) 看作空粒率差异显著的临界值。为了进一步确定持续天数, 分别选取气温在 19°C , 持续天数为 1 天、2 天和 3 天的空粒率资料。经 t 检验^[4], $t_{1,2}=1.80$, $t_{2,3}=8.14$ ($t_{0.05}(12)=2.18$)。由此可见, 气温在 19°C 的情况下, 持续 1 天和两天, 空粒率没有明显的差异, 而持续两天和 3 天, 则有明显的差异。由以上分析, 可认为, 气温等于 19°C (或小于 20°C), 持续 3 天是水稻发生冷害的温度指标。用此指标考察盆地区以往共发生的 5 次冷害, 温度平均误差不大于 0.4°C , 空粒率不低于 27%; 凡未达到以上指标的, 均未发生冷害。

四、温度分布状况和产量的关系

1. 方差分析

水稻的丰欠, 在一定程度上, 受温度分布状况所制约。为了探索不同时段温度分布状况对产量影响的显著性, 依据勉县、汉中、西乡历年产量分布, 用 20 天滑动平均气温进行丰、平、欠年的方差分析, 其结果见表 1:

由表 1 看出, 7 月上旬到下旬, 8 月上旬到 9 月上旬, 20 天滑动平均气温对产量的影响较大, 尤其是以 8 月中旬到 9 月上旬最为明显, 构成温度影响产量的两个显著时段。从方差分析的序列来看, 7 月上旬到下旬, 丰收年温度偏低, 欠收年温度偏高; 8 月中旬到 9 月上旬, 恰相反, 丰收年温度偏高, 欠收年温度偏低。8 月下旬到 9 月上旬, F 值最大, 说明此阶段水稻对温度的变化最敏感。这一结论将在下面的回归积分中进一步得到证实。

表 1 方差比值表

F 比值 时 段 地 点	上/5		中/5		下/5		上/6		中/6		下/6		上/7		中/7		下/7		上/8		中/8		下/8		上/9		中/9		资料年代
	中/5	下/5	上/6	中/6	下/6	上/7	中/7	下/7	上/8	中/8	下/8	上/9	中/9	下/9															
勉 县	1.95	0.31	0.02	0.29	0.17	0.82	4.70 ²⁾	0.77	0.76	5.13 ²⁾	7.51 ³⁾	11.79 ³⁾	1.72	1.21	1951—1976年 ¹⁾														
汉 中	0.22	3.20	3.74 ²⁾	1.13	1.45	1.11	3.45 ²⁾	4.25 ²⁾	0.11	2.72	4.59 ²⁾	5.49 ²⁾	3.38	1.15	1951—1976年														
西 乡	1.40	0.07	0.15	3.15	3.09	1.94	0.63	4.37 ²⁾	4.44 ²⁾	5.13 ²⁾	4.73 ²⁾	4.66 ²⁾	0.20	0.78	1958—1976年														

1) 1951—1957 年资料系由汉中求出的内插值

2) 信度为 0.05 3) 信度为 0.01

2. 回归积分

为了定量地研究气象因子分布状况对产量的影响, 以往一般是将作物分为若干个时段, 对每个时段分别求其回归相关。但这一方法要求的资料年代较长, 运算也较繁琐, 不易实现。1924 年, 英国学者 Fisher, R. A. 在研究 Rothamsted 试验站历年冬小麦产量与降水量分布的关系时, 提出了回归积分的概念^[5]。35 年后, 日本学者松田昭美曾用这一方法研究福冈地区日照时数分布与水稻产量的关系, 得出了很好的结果^[1]。

如果将作物的生育期分为 T 个小时段, 按照回归积分的概念, 作物的产量可用下式来表达^[5]

$$\hat{y}_c = C + \int_0^T a_s(t) S_s(t) dt \quad (5)$$

式中 \hat{y}_e 是气候产量的估值, C 为待定常数, $S_i(t)dt$ 是 t 到 $t+dt$ 时段内的温度值, $a_i(t)$ 为温度对于产量影响的时间函数, 它表示温度变化 1°C , 作物产量的平均增量。

由于 $a_i(t)$ 通常是一个相互独立、变化缓慢的时间函数, $S_i(t)$ 为温度的时间函数, 因而可用有限个项数 K 的正交标准多项式分别来表达:

$$a_i(t) = a_0 T_{i,0} + a_1 T_{i,1} + \cdots + a_k T_{i,k} \quad (6)$$

$$S_i(t) = \rho_0 T_{i,0} + \rho_1 T_{i,1} + \cdots + \rho_k T_{i,k} \quad (7)$$

$$(k = K-1)$$

式中 $T_{i,k}$ 为时间的正交标准函数, a_0, a_1, \cdots, a_k 为偏回归系数, $\rho_0, \rho_1, \cdots, \rho_k$ 为温度的分配系数, 可依据下式:

$$\rho_k = \int_0^T T_{i,k} S_i(t) dt \quad (k=0, 1, \cdots) \quad (8)$$

求出。将公式(6)代入(5)得

$$\begin{aligned} \hat{y}_e &= C + \int_0^T (a_0 T_{i,0} + a_1 T_{i,1} + \cdots + a_k T_{i,k}) S_i(t) dt \\ &= C + a_0 \int_0^T T_{i,0} S_i(t) dt + a_1 \int_0^T T_{i,1} S_i(t) dt + \\ &\quad \cdots + a_k \int_0^T T_{i,k} S_i(t) dt \end{aligned} \quad (9)$$

由于求取 $T_{i,k}$ 较麻烦, 后来, Davis, F. E. 和 Pallesen, J. E. 为使计算简化, 利用公式

$$\rho'_k = \int_0^T \xi'_{i,k} S_i(t) dt \quad (10)$$

将公式(7)变为

$$S_i(t) = \frac{\rho'_0 \xi'_{i,0}}{\sum(\xi'_{i,0})} + \frac{\rho'_1 \xi'_{i,1}}{\sum(\xi'_{i,1})} + \cdots + \frac{\rho'_k \xi'_{i,k}}{\sum(\xi'_{i,k})}$$

又因为^[1]

$$\frac{a_k}{\sum(\xi'_{i,k})} = a'_k$$

则

$$a_k T_{i,k} = a'_k \sqrt{\sum(\xi'_{i,k})} \cdot \frac{\xi'_{i,k}}{\sqrt{\sum(\xi'_{i,k})}} = a'_k \xi'_{i,k} \quad (11)$$

将公式(11)代入(9)得

$$\hat{y}_e = c + a'_0 \int_0^T \xi'_{i,0} S_i(t) dt + a'_1 \int_0^T \xi'_{i,1} S_i(t) dt + \cdots + a'_k \int_0^T \xi'_{i,k} S_i(t) dt \quad (12)$$

将公式(10)和(11)分别代入公式(12)和(6)得:

$$\hat{y}_e = c + a'_0 \rho'_0 + a'_1 \rho'_1 + \cdots + a'_k \rho'_k \quad (13)$$

和

$$a_j(t) = a'_0 \xi'_{i,0} + a'_1 \xi'_{i,1} + \cdots + a'_k \xi'_{i,k} \quad (14)$$

这样, 就把时间的正交标准函数化为正交非标准函数, 由于 $\xi'_{i,k}$ 可在正交多项式表中查到, 使计算大大简化。于是, 求 $a_i(t)$ 函数的问题就归结为求解多元回归方程的问题了。

利用汉中农科所 1952—1976 年 23 年水稻气候产量和旬平均气温资料, 将水稻生育

期 5—9 月分为 15 个时段，用电子计算机计算^[6-7]，得 a'_0, a'_1, \dots, a'_6 ，经迴归效果检验 ($F=6.24, F_{0.01}(7, 15)=4.14$) 和系数检验 ($\rho'_2, \rho'_3, \rho'_5$ 和 ρ'_6 被剔除) 得

$$\hat{y}_c = -945.3 + \int_0^{15} a_i(t) S_i(t) dt \quad (15)$$

利用(15)式可求出水稻产量的估值。将气候产量的实际值与估值点绘如图 2

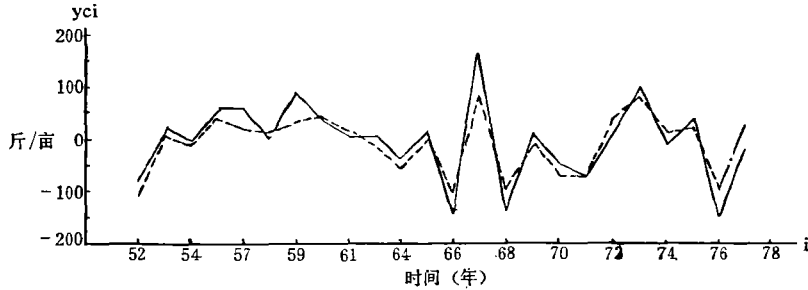


图 2 历年产量的拟合曲线
(虚线为计算产量，实线为实际产量，点划线为预报值)

由图 2 看出，两者拟合的较好。若初春可作出 5—9 月逐旬平均气温预报，则可利用上式对当年水稻产量进行估计。例如用 1977 年气温资料回代，气候产量的估值为 27 斤/亩，实际值为 -11 斤/亩 (误差 7%)。将 $a_i(t)$ 值点绘如图 3:

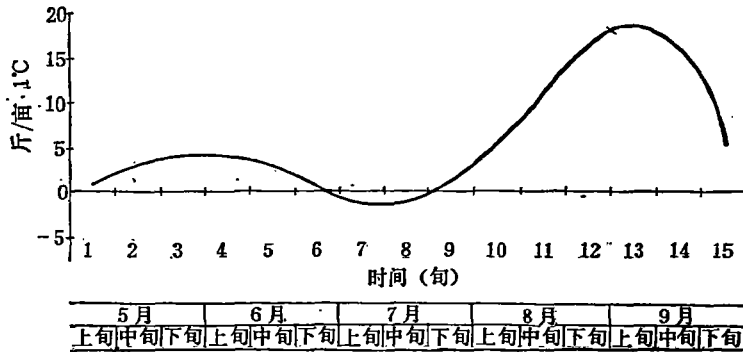


图 3 $a_i(t)$ 函数分布曲线

由图 3 明显看出， $a_i(t)$ 函数有两个峰点和一个谷点。峰点分别出现在 5 月下旬到 6 月上旬和 9 月上旬；谷点出现在 7 月上旬。峰点反映了旬平均气温上升(下降)1°C，水稻产量平均增加(减少)的最大值；谷点反映了旬平均气温上升(下降)1°C，水稻产量平均减少(增加)的最大值。

由 5 月上旬到 6 月中旬，7 月下旬到 9 月下旬，旬内温度偏高对产量有正效果，其中以 5 月下旬到 6 月上旬和 8 月下旬到 9 月上旬产量的平均增量最大。前者正值水稻插秧阶段，晴朗的天气有利于壮秧，为尔后产量的形成奠定良好的基础，此时，旬平均气温上升 1°C，产量平均增加 3 斤左右；后者正值水稻抽穗开花至灌浆初期，旬平均气温降低 1°C，产量平均减少 15—18 斤，为水稻全生育期对温度变化最敏感的时段。它表征了秋季低温和水稻产量的定量关系。由 7 月上旬到中旬，旬内温度偏高对产量有负效果，其中以 7 月

上旬影响最大。此时是全年气温最高的时期,而水稻正处在幼穗分化阶段,旬平均气温上升 1°C ,每亩稻田平均减少2斤左右,说明盛夏季节温度已处于水稻适温的上限,因而温度偏高对幼穗分化有抑制作用。这和方差分析的结果是趋于一致的。

图3还指出,9月中旬,旬平均气温上升 1°C ,每亩稻田尚有15斤的增量,它表明,即使在8月下旬到9月上旬水稻遇到冷害,在空粒率不太高的前提下,只要9月中旬有足够的回温,就能在一定程度上弥补冷害所造成的损失。例如1972年和1976年均遇冷害,纵使所处低温状况不同,由于1972年有较高的回温,其减产幅度远比1976年小。

利用汉中气象台39年气温资料,依据图3求得本区水稻产量与历年平均值的最大偏差为 ± 270 斤,即产量大体在460—1000斤之间变动。因而可以看出,在水分条件相对稳定的情况下,温度的变异与分布不均是导致本区水稻产量不稳和波动大的原因。

五、冷害的周期性与预报

气象要素的变化经常呈现为一种波动,低温(冷害)亦属此列。从实践得知,冷害是具有周期性的,因而,可用谐波分析进行分解,找到其振幅和初位相,用统计检验确定主要周期,用以预报。

谐波分析可用下式来表达

$$T_n = A_0 + A_1 \sin\left(n \frac{2\pi}{L_1} + \theta_1\right) + A_2 \sin\left(n \frac{2\pi}{L_2} + \theta_2\right) + \dots \quad (16)$$

式中 T_n 为一组温度序列, n 从0到 N ,即 T_0, T_1, \dots, T_N ,每一个代表一个温度观测值。 L_1, L_2, \dots 为周期长度。 A_0 为常数项,是序列的均值。 A_1, A_2, \dots 为各周期振幅。 $\theta_1, \theta_2, \dots$ 为各周期的初位相。只要知道了周期长度,即可由温度序列求出 $A_1, A_2, \theta_1, \theta_2$ 等,进行外推,预报未来变化。

本文的目的并不在于求得(16)式,而是为了找出主要周期,以便预报冷害的趋势。因此,若求出 A_1^2, A_2^2, \dots ,并与临界值 $K = \frac{4\sigma^2 \ln(20n)}{N}$ (σ^2 为序列的均方差, n 为试验周期的次数, N 为序列的总数)进行比较,当 $A^2 > K$ 时(信度为5%)^[8],此振幅所对应的周期即为主要周期。

由汉中气象台8月21日至9月5日43年日平均气温资料中,挑取最低值 t_n ,得到 $T_n (T_n = t_n - 19^{\circ}\text{C})$ 序列,经计算 A^2 与 K 值如表2。

由表2知,冷害的主要周期为4年。为了使这个结果更可靠一些,将原序列进行方差分析,也得到同样结果(见图4, $F = 3.85, F_{0.05} = 2.85$)。因此,由1976年外推,预计1980年将有冷害发生。

表2 各周期振幅平方值(A^2)与临界值 K

周期长度	2	3	4	5	6	7	8	9	K
振幅 A^2	0.35	0.07	2.41	0.66	0.27	0.28	0.20	0.32	1.78



图 4 1935—1977 年 8 月 21 日—9 月 5 日平均气温 T 。序列方差分析
(实线为实际值,虚线为拟合值,点划线为预报值)

六、几点结论

1. 日平均气温等于 19°C (或小于 20°C)，持续 3 天是中籼型水稻发生冷害的临界温度。

2. 温度的分布状况和水稻产量的形成存在着高度相关。影响最显著的时段出现在 5 月下旬到 6 月上旬、7 月上旬和 8 月下旬到 9 月上旬。7 月上旬有最大的负效果、旬平均气温上升(降低) 1°C ，每亩水稻平均减少(增加) 2 斤左右；8 月下旬到 9 月上旬有最大的正效果，旬平均气温降低(升高) 1°C ，每亩水稻平均减少(增加) 15—18 斤。

3. 本区冷害的周期多为 4 年。

在此工作中，曾得到西北大学数学系马家录老师的协助，陕西省气象科学研究所杜继稳同志参加编制计算机程序设计，这里一併致谢。

参 考 文 献

- [1] 松田昭美, 暖地における水稻栽培と气象要因の统计学研究(1), 农业气象 15 卷 1 号, 1959 年。
- [2] 潘瑞炽主编, 水稻生理, 科学出版社, 1979 年。
- [3] 高亮之, 庞燕琦, 蔡显圣, 影响晚稻结实率的低温条件研究, 天气月刊, 1959 年, 8 期。
- [4] 方差分析, 中国科学院数学研究所统计组编, 科学出版社, 1977 年。
- [5] Fisher, R. A., The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted, Roy. Soc. [London] *Phil. Trans. Ser. B.* 213, 1924.
- [6] 正交设计法, 北京大学数学力学系概率统计组编, 石油化学工业出版社, 1976 年。
- [7] 回归分析方法, 中国科学院数学研究所数理统计组编, 科学出版社, 1975 年。
- [8] 天气分析和预报, 北京大学地球物理系气象教研室编, 科学出版社, 1976 年。

**ELEMENTARY RESEARCH ON DAMAGE TO RICE
DONE BY LOW TEMPERATURE IN HANZHONG
BASIN OF SHAANXI PROVINCE**

Xu Zun-wu

(Meteorological Research Institute of Shaanxi Province)

Abstract

In this paper, by twice comparative examinations analysis of variance and regressive integration, the temperature scale on damage to rice done by low temperature is calculated; the empirical formula of integration of yield forecast and the time function $a,(t)$ which shows the influence of temperature to yield are established; therefore the quantitative relation of rice yield and temperature distribution is revealed; and this will provide the foundation for steady and high production.