

农作物种植密度与小气候*

傅 抱 璞

(南京大学气象系)

一、引 言

我国1958年大跃进以来的实践证明,合理密植是提高单位面积产量,获得农业丰收的一项重要措施。因为合理的密植可以在增加农田单位面积上植株数目的条件下,增加光合作用的面积,充分有效地利用太阳光能制造有机物质,并形成有利于植物生长的农田小气候。但是,当种植密度超过一定限度时,由于单位农田面积上的叶面积过大,植株间的光照不足,温度过低和空气湿度太大,被遮蔽的下部叶片几乎不再是植物有机物的合成器官,而转变为有机物的消耗者,因而引起光合作用的强烈减弱,不能有效地累积营养物质,并且植株茎干细弱,组织松弛,根系不易深入土层,容易发生病害和倒伏,以致产量反而减少。因此,在研究密植田中的小气候时,应该注意通过了解种植密度对小气候影响的规律,确定各种作物合理密植的临界限度,以及找出由于密植所产生的某些不利气候条件的改善途径和方法。

本文的主要目的,是研究各种气象要素随作物种植密度变化的规律性,探讨作物最适宜种植密度的理论方法。文中虽然综合了我国许多地方可以利用的实验资料,但是在分析某一气象要素在某种作物中随种植密度的变化时,所采用的资料都是在同一地方按照统一布置所获得的实验结果,即每一个实验除作物的种植密度不同以外,其他一切条件(试验地点、观测方法、地形和土壤条件、作畦面积、作物品种、播种日期、种植方式和水、肥供应情况等)都完全相同,这样既有概括性,也有比较性。其所以有概括性,是因为综合了许多地方对各种不同作物实验的资料进行分析,而不是只在个别地方或个别作物中的偶然结果;其所以有比较性,是因为每一气象要素在每种作物中随种植密度的变化是各根据在同一地方按照统一布置所进行的实验得到的。

在本文中所引用的资料,光照是用照度计测定,空气温、湿度用热电偶干湿表或通风干湿表测定,土壤温度用沙维诺夫地温表测定,风速用热敏微风仪和手提风速表测定(对每一种作物来说,所用观测仪器都是一样的),土壤湿度用称重法(即土钻法)测定。各要素每天观测的时间及钻取土壤样本重复的次数均按农业气象观测规范进行。

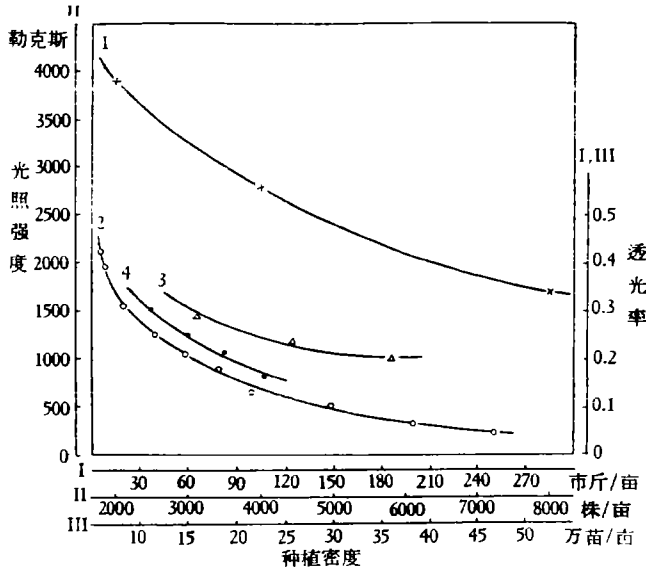
二、资料的分析

1. 密度与光照

当种植密度增加时,由于单位农田面积上的植物体增加,对太阳光线的遮蔽作用加

* 本文采用了全国许多农业研究部门的农业气象实验资料,谨此向供应这些资料的部门致谢。

强,作物田中的相对光照强度或透光率(通常以作物间的光照强度 I' 与植株上方自然光照强度 I 的比值或百分比表示之)也必随之减小。从图 1 可以看出,当种植密度开始由小增大时,作物田中的光照强度和透光率都急剧地减小。但是,当种植密度达到一定程度以后,光照强度和透光率减小的速率就变得很缓慢了。如果以光照强度 I' 和透光率 $m_p \left(= \frac{I'}{I} \right)$ 为纵坐标,种植密度 N 的对数 $\log N$ 为横坐标,则 I' , m_p 与 N 具有如图 2 所表示的直线关系。因此,作物田中的光照强度或透光率是随着种植密度的对数而递减的,如以公式表示之,即



- 1——棉花地(郑州, 1959年7月晴天, 开花期)
 2——小麦地(郑州, 1959年4月中旬, 孕穗期)
 3——水稻田(广东石牌, 1959年10月7—10日, 抽穗期)
 4——玉米地(太原, 1959年7月23日晴天, 开花期)
 1, 4用第II组标尺; 2用第I组标尺; 3用第III组标尺

图 1 作物田中植物覆盖层下的日平均光照强度或透光率随种植密度的变化
 (本图是根据河南农业科学院农业气象研究室、河南郑州农业气象试验站, 广东农业科学研究所农业气象研究组、广东石牌农业气象试验站及山西省农业建设厅气象局、山西农业科学院农业气象研究室的实验资料绘制)

$$m_p = A - B \log N, \quad (1)$$

或

$$I' = I(A - B \log N), \quad (2)$$

式中 A 和 B 均为决定于作物品种、发育阶段和农业技术措施的常数。

作物田中的透光率随种植密度而递减的速率在一天中的不同时间也不相同。例如,从图 3 可以看出,在午后 13 时,虽然由于太阳光线直射株间,各种播种密度下的小麦田中的透光率都相对地较大,但是透光率随播种密度增大而递减的变化却非常急剧。在早晨 7 时,和下午 17 时,因为阳光斜射,各种不同密度田中的透光率都减小了,但是透光率随播种密度的变化也比正午前后相对地缓和。

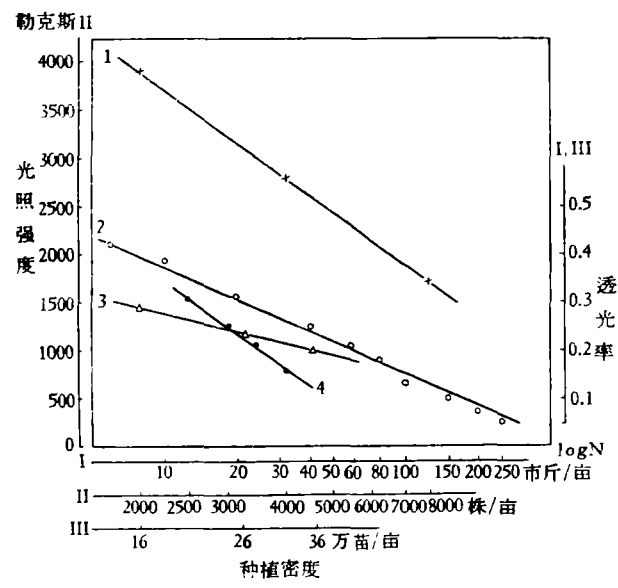


图 2 在半对数座标中作物田中的日平均光照强度或透光率随种植密度的变化(图例同图 1)

从图 3 还可看出,在一天中不同时间透光率的差异是随着播种密度增大而逐渐减小的,如果在孕穗期播种密度小于 40 市斤/亩的小麦田中一天内透光率的变化可以达到 30% 甚或更大的话,则当播种密度超过 200 市斤/亩时,透光率的日变化就不过只有百分之几而已。

表 1 为两种不同栽植密度的水稻田中在各个发育期中的透光率。由该表可见,作物田中的透光率是随着植物的生长发育在逐渐减小的,因而不同栽植密度作物田中透光率的差也在不断地发生改变。在生长初期,由于植物幼小,对太阳光线的遮蔽作用不大,栽植密度对透光率的影响表现最小。当作物进入拔节阶段以后,透光率随栽植密度的变化就显著增大。但是在生长末期,不同栽植密度田间透光率的差异又复减小。

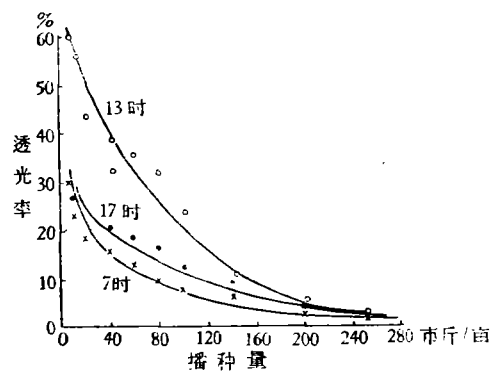


图 3 小麦田中各时间透光率随播种密度的变化
(郑州, 1959 年 4 月中旬, 孕穗期)
(本图根据河南农业科学院农业气象研究室河南郑州农业气象试验站的资料绘制)

表 1 不同栽植密度的水稻田中在各发育期的透光率(%) (广东石牌, 1959 年)*

发育期 栽植密度	分蘖期 (4 月 14—15 日)	拔节期 (5 月 28—29 日)	孕穗期 (9 月 23—30 日)	始穗期 (10 月 1—5 日)	乳熟期 (10 月下旬)
16 万苗/亩	63	63	25	29	14
26 万苗/亩	63	59	22	24	13
差 值	0	4	3	5	1

* 根据广东石牌农业气象试验站的资料

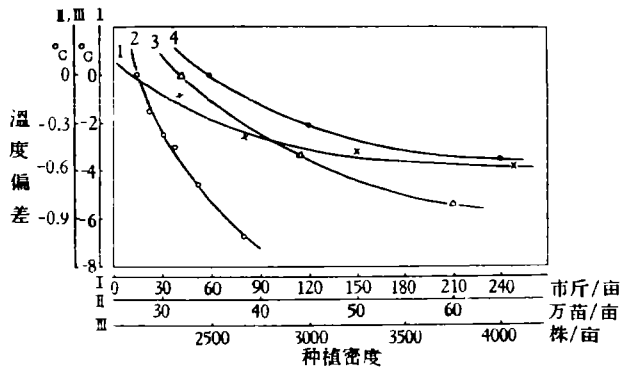
2. 密度与温度

因为种植密度愈大，白天射入作物层中的太阳辐射和夜间作物层中的有效辐射都愈减小，所以作物内的昼间温度必愈降低，而夜间温度则愈提高，因而温度日较差就愈减小。表 2 是 1959 年 7 月 23 日在不同栽植密度的玉米地中的观测纪录。从该表看出，当栽植密度从 2,500 株/亩增加到 4,000 株/亩时，植株间 50 厘米高度处的最高气温减低 0.5℃，最低气温提高 0.1℃，而温度日较差减小 0.6℃。

表 2 玉米地 50 厘米高度处株间极端气温及日较差随栽植密度的变化
(太原, 1959 年 7 月 23 日少云天)*

温度(℃)	密度(株/亩)	2500	3000	4000
最高温度		31.2	30.9	30.7
最低温度		18.8	18.8	18.9
日较差		12.4	12.1	11.8

* 根据山西省农业建设厅气象局、山西农业科学院农业气象研究室的实验资料



- 1——小麦地 5 厘米深处的土温(郑州, 1959 年 4 月中旬, 孕穗期)
- 2——小麦地 50 厘米高度处的株间气温(郑州, 1959 年 4 月中旬, 孕穗期)
- 3——水稻田 5 厘米深处的土温(昆明, 1956 年 7 月 5—6 日, 晴天)
- 4——玉米地 20 厘米高度处的株间气温(太原, 1959 年 6 月 24 日晴天, 拔节期)
- 1, 2 用第 I 组标尺 3 用第 II 组标尺 4 用第 III 组标尺

图 4 作物田中的日平均温度(以与最小密度田中的温度差表示之)
随种植密度的变化

(根据河南农业科学院农业气象研究室、河南郑州农业气象试验站, 云南昆明农业气象试验站及山西省农业建设厅气象局、山西农业科学院农业气象研究室的实验资料绘制)

图 4 为某些作物田中日平均气温和土温随种植密度的变化。从这个图上可以看出，当种植密度由小增大时，作物田中的温度最初减低很快，但是当种植密度达到一定程度以后再继续增大时，温度低减的变化就很缓和。如果将这种变化曲线绘在以温度偏差(与最小种植密度地的温度差)为纵座标，而种植密度 N 的对数为横座标的半对数座标系统中，则作物田中的气温和土温随种植密度的变化就几乎成一直线(见图 5)。因此，设以 T_1 和 T 分别代表在某一已知种植密度 N_1 和任意种植密度 N 下的作物田中的气温或土温，则 T

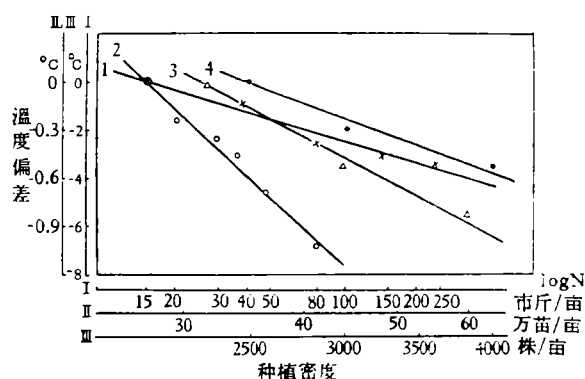


图5 在半对数座标中作物田中的日平均温度与种植密度的关系(图例同图4)

与 N 的依赖关系可以近似地表示为

$$T = T_1 - C \log \frac{N}{N_1} \quad (3)$$

这里 C 为一个决定于作物品种、发育阶段、农业技术措施、地理条件和季节等因素的常数。

公式(3)表明,在中低纬度地区,作物田中的平均温度随着种植密度增大而减低的变化的近似地遵守着对数关系,这与作物田中透光率随种植密度的变化是完全一致的。

3. 密度与湿度

种植密度愈大,表示单位面积上的植株数愈多,因而植物从土壤中吸取消耗于蒸腾的水分也愈增加,这就使得作物地中的土壤湿度随着种植密度增大而减小。图6为棉花地中0—1米层内的土壤湿度与栽植密度的关系。

该图表明,作物地中的土壤湿度是随着栽植密度增大而线性地减小的,但递减的速率则因发育阶段而不同,其最大变化是发生在植物需水最多的生长旺盛期间。

与土壤湿度的变化相反,作物地中的空气湿度是随着种植密度增加而逐渐增大的,因为当密度增加时,在植物蒸腾水分增多的同时,风速和乱流交换都随之减弱,更有利于保持植株间的水汽不易向外逸散。此外,由于密度增加,空气温度减低,也进一步加强了植株间的相对湿度提高。图7为1959年某些作物田中的相对湿度与种植密度的关系。图中横座标为以各种作物最小种植密度为单位量度的相对密度,纵座标为株间的相对湿度。在这个图上表明着各种作物田中的相对湿度都几乎是随着种植密度而线性地增大。因此,对于作物田中的土壤湿度和空气湿度都可以近似地用下列形式的实验公式来表示:

$$H = H_0 - a \cdot N, \quad (4)$$

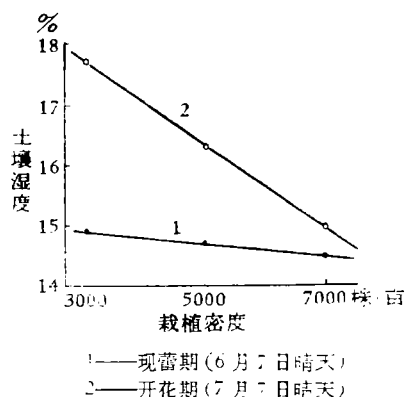
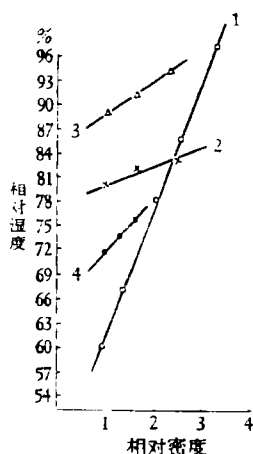


图6 棉花地中0—1米层内的土壤湿度与栽植密度的关系(郑州,1957年)

(根据河南农业科学院农业气象研究室,河南郑州农业气象试验站的资料绘制)



- 1——小麦地 20 厘米高度处, 最小密度 15 市斤/亩(郑州, 1959 年 4 月中旬, 孕穗期)
 2——棉花地 2/3 株高处, 最小密度 3000 株/亩(郑州, 1959 年 8 月中旬—9 月中旬)
 3——水稻田 20 厘米高度, 最小密度 16 万苗/亩(广东石牌, 1959 年 9 月 22—30 日, 孕穗期)
 4——玉米地 20 厘米高度处, 最小密度 2500 株/亩(太原, 1959 年 7 月 2 日晴天, 玉米进入第 5 叶)

图 7 作物田中株间相对湿度随种植密度(以最小密度为 1 单位)的变化
(资料来源同图 1)

的风速照例是随着种植密度增加而减低。图 8 是棉花地和水稻田中的风速随栽植密度递减的一个例子。图中右边的横座标代表水稻田中的通风率(用 20 厘米高度处株间的风速与 150 厘米高度处植株上方的风速的百分比表示之)。从这个图上可以看出, 仿佛光照和温度一样, 风速随种植密度的变化也是最初很快, 而后就逐渐缓慢了。根据试验结果, 作物田中的风速 u 和种植密度 N 之间的关系可以近似地用下列指数公式表示之:

$$u = u_0 e^{-fN} \quad (6)$$

这里 u_0 为开垦地方或植株上方 某一定高度上的风速, f 为决定于植物品种、发育情况、测定 u 与 u_0 的高度及农田中测点位置的常数。

5. 密度与产量

从以上的讨论我们可以看出, 密植田中的小气候特点是光照少、风速弱、平均温度低和空气湿度高, 而所有这些特点都会以正的或负的作用或多或少地影响作物的生长发育

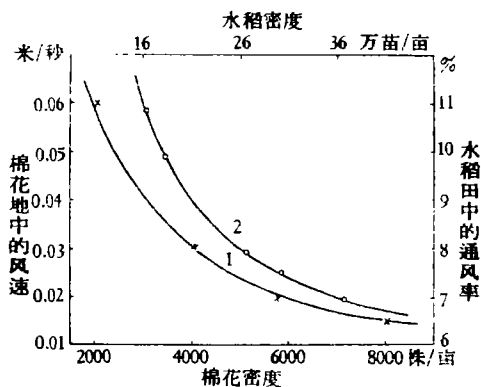
$$r = r_0 + bN \quad (5)$$

式中 W 和 r 为在种植密度为 N 时作物地中的土壤湿度和空气相对湿度, W_0 和 r_0 为裸地的相应湿度; a 和 b 为决定于作物品种、发育阶段、农业技术措施、地理条件和季节等因素的参数。当通过实验方法确定了这些参数之后, 就可以根据(4)和(5)式利用裸地的湿度资料来估计各种种植密度作物地中可能出现的土壤湿度和空气湿度。

我国 1958 年以来许多观测资料证明: 在过分密植的禾本科植物田中的相对湿度大多平均在 90% 以上, 特别是在密植的水稻田中, 由于水分供应充足, 株间相对湿度可以经常达到 95% 以上甚至接近 100%。但是, 按照苏联地球物理现象总台的研究, 最有利于大多数作物发育的田间日平均相对湿度是 70% 左右, 过高的相对湿度不仅会延迟植物的开花和结实, 对植物的授粉作用发生不良影响, 而且也容易引起植物的病害。

4. 密度与风速

植物愈稠密, 对地面附近空气运动的摩擦阻力愈大, 气流愈不容易侵入作物层中, 因此作物中



- 1——棉花地(郑州, 1959 年 7 月 15 日, 开花期)
 2——水稻田(广东石牌, 1959 年 9 月 22—30 日, 孕穗期)

图 8 作物田中的风速(或通风率)随种植密度的变化

(根据河南农业科学院农业气象研究室, 河南郑州农业气象试验站及广东农业科学研究所农业气象研究组, 广东石牌农业气象试验站的资料绘制)

以至最后的产量。但是,在通常情况下,决定作物产量的最重要的因子是田间的光照条件。根据 Л. А. 依万诺夫 (ИВАНОВ)^[1], 作物产量和光合作用的关系可以用下列公式来表示:

$$M + (m_1 + m_2 + \cdots + m_n) = (\bar{f}_1 \bar{P}_1 T_1 + \bar{f}_2 \bar{P}_2 T_2 + \cdots + \bar{F}_n \bar{P}_n T_n) - (\bar{r}_1 \bar{P}'_1 T'_1 + \bar{r}_2 \bar{P}'_2 T'_2 + \cdots + \bar{r}_n \bar{P}'_n T'_n). \quad (7)$$

式中 M 为在收获时整个植物的干重量 (减去由于无机养料得出来的而非光合作用制造出来的氮和灰); m_1, m_2, \cdots 为在各个生长期間脱落的植物部分的干重量; $\bar{f}_1, \bar{f}_2, \cdots$ 及 $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \cdots$ 为在各个生长期間光合作用的平均强度和进行光合作用的平均叶面积; $\bar{r}_1, \bar{r}_2, \cdots$ 和 $\bar{P}'_1, \bar{P}'_2, \cdots$ 为在相应期內呼吸作用的平均强度和植物呼吸的面积; $\bar{T}_1, \bar{T}_2, \cdots$ 和 $\bar{T}'_1, \bar{T}'_2, \cdots$ 表示在各个生长期間光合作用和呼吸作用的持续时间。

根据文献[2, 3], 一般阳性植物叶片的光合强度与光照强度的关系是一双曲线, 可以近似地用以下公式来表示:

$$f = \frac{bI'}{1 + aI'}. \quad (8)$$

式中 f 为单位叶面积的光合强度; I' 为光照强度; a, b 为决定于植物品种、发育阶段、水分和肥料供应情况及气候条件的常数, 可由单株植物实验而求得。

大家知道, 在一般情况下, 植株間任何高度的光照强度可以近似地表示为

$$I' = Ie^{-\alpha k N y}. \quad (9)$$

这里 I 为植株上方的光照强度 (即自然光照强度); I' 为在植株表面以下 y 处的光照强度; N 为单位农田面积上的植株数; x 为每单位植株长度内的植物面积 (包括叶面积与茎面积); k 为植物有效遮光面积 x' 与实际面积 x 的比例系数, 其值决定于叶子的排列情况; α 为每单位有效遮光面积的消光系数。

将(9)代入(8)中并对 y 积分, 便得到整个植物群体的平均光合强度 (\bar{f}):

$$\bar{f} = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{bIe^{-\alpha k N y}}{1 + aIe^{-\alpha k N y}} dy,$$

即

$$\bar{f} = \frac{b}{a\alpha k N x h} \ln \frac{1 + aI}{1 + aIe^{-\alpha k N x h}}.$$

这里 h 为植株的平均高度, xh 代表单株植物的总面积。如果不考虑对总面积影响不大的植物的茎面积, 则 xh 就近似地等于植物的单株叶面积 $A(N)$, 这个面积通常是植株密度 N 的函数, 将它代入上式, 得

$$\bar{f} = \frac{b}{a\alpha k N A(N)} \ln \frac{1 + aI}{1 + aIe^{-\alpha k N A(N)}}. \quad (10)$$

将(10)式从日出时间 t_1 到日没时间 t_2 积分, 即得到植物群体每单位叶面积的平均光合日总量:

$$F = \frac{b}{a\alpha k N A(N)} \int_{t_1}^{t_2} \ln \frac{1 + aI}{1 + aIe^{-\alpha k N A(N)}} dt. \quad (11)$$

而每单位叶面积的呼吸日总量为

$$R = \bar{r} \tau. \quad (12)$$

其中 \bar{r} 为植物的日平均呼吸强度; τ 为在一天中植物进行呼吸作用的时间, 亦即一天的时间长度。

假定植物光合面积和呼吸面积相等, 即 $P = P' = NA(N)$, 我们可以将(7)式写为:

$$M + \sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{b_i T_i}{a_i \alpha_i k} \int_{\bar{t}_{i1}}^{\bar{t}_{i2}} \ln \frac{1 + a_i I}{1 + a_i I e^{-a_i k N \bar{A}_i(N)}} dt - N \bar{A}_i(N) T_i \bar{r}_i \tau \right]. \quad (13)$$

或

$$M + \sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n W_i. \quad (13a)$$

这里指数 i 代表第 i 个生长期; T_i 代表第 i 个生长期的日数; \bar{t}_{i1} , \bar{t}_{i2} 代表在第 i 个生长期中平均日出和日没的时间; \bar{A}_i 为在第 i 个生长期中植物的平均单株叶面积; \bar{r}_i 为在 i 个生长期中植物群体的日平均呼吸强度; W_i 代表在第 i 个生长期 每单位农田面积上植物群体的净光合量(等于光合量减呼吸量), 其值等于(13)式右端第 i 项, 即

$$W_i = \frac{b_i T_i}{a_i \alpha_i k} \int_{\bar{t}_{i1}}^{\bar{t}_{i2}} \ln \frac{1 + a_i I}{1 + a_i I e^{-a_i k N \bar{A}_i(N)}} dt - N \bar{A}_i(N) T_i \bar{r}_i \tau.$$

当植株密度增加时, 由于植物层中光照强度减小, 光合作用减弱, 植物的单株叶面积也将减小(参看图9)。从图10所表示的玉米的例子可以看出, 单株最大叶面积 $A_M(N)$ 与种植密度 N 具有很接近于对数的关系, 如以公式表示之, 即

$$A_M(N) = C - D \ln N. \quad (14)$$

式中 C , D 为决定于作物品种和水、肥、气候等条件的参数。

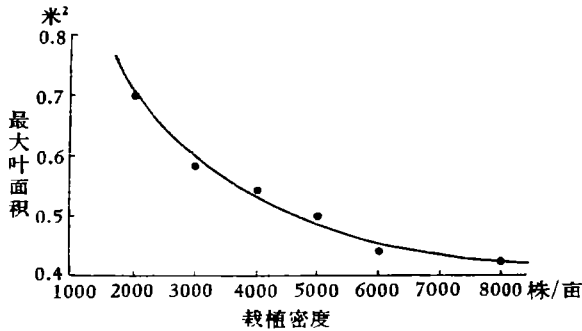


图9 玉米单株最大叶面积与栽植密度的关系
(江苏东台, 1959年)

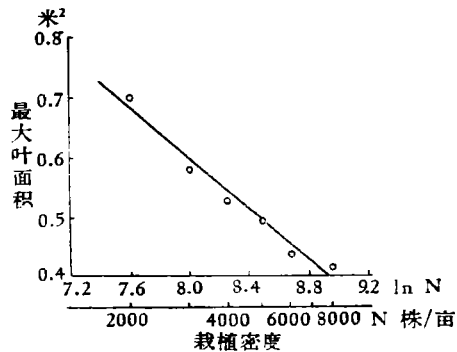


图10 在半对数座标系统中玉米单株最大叶面积与栽植密度的关系

(根据苏北农学院在江苏东台的实验资料绘制)

在一定的情况下, 净光合作用是植株密度 N 和单株叶面积 $A(N)$ 的函数, 而 $A(N)$ 又是 N 的函数, 所以净光合作用或作物产量 M 实际上只是 N 的函数, 这就告诉我们, 为了获得作物的最高产量, 必须选择适宜的种植密度 N_s , 当密度大于或小于这个适宜的临界值时, 作物产量都会或多或少地降低。但是, 在生长初期, 作物对太阳光线的遮蔽作用不大, 作物田中并不会感到光照的不足。在生长后期, 作物田中的透光率基本上没有多大变化, 甚或比前一阶段有些增加。因此, 种植密度对作物田中的光照和植物群体光合作用的最大影响是发生在植株高度已大而枝叶茂密的生长期的中期(即由营养生长期转入生殖生

长的一段时期), 如果种植密度能使这个期间植物群体的净光合作用达到最大值, 则作物的经济产量可以期望最大。

现假定在作物生长的第 j 个时期种植密度对作物田中的光照和植物群体的光合作用影响最大, 则根据数学的方法, 要使(13)式右端第 j 项(即 W_j)具有最大值, N 必须满足下列方程式:

$$\frac{\partial W_j}{\partial N} = b_j T_j \int_{t_{j1}}^{t_{j2}} \frac{I e^{-a_j k N \bar{A}_j(N)}}{1 + a_j I e^{-a_j k N \bar{A}_j(N)}} \left[N \frac{\partial \bar{A}_j(N)}{\partial N} + \bar{A}_j(N) \right] dt - T_j \tau \bar{r}_j \left(N \frac{\partial \bar{A}_j(N)}{\partial N} \right) + \bar{A}_j(N) = 0,$$

即

$$\int_{t_{j1}}^{t_{j2}} \frac{I e^{-a_j k N \bar{A}_j(N)}}{1 + a_j I e^{-a_j k N \bar{A}_j(N)}} dt = \frac{\bar{r}_j \tau}{b_j}. \quad (15)$$

令 $E = e^{a_j k N \bar{A}_j(N)} / a_j$, 则上式左端的积分可以写为

$$\int_{t_{j1}}^{t_{j2}} \frac{I e^{-a_j k N \bar{A}_j}}{1 + a_j I e^{-a_j k N \bar{A}_j}} dt = \frac{1}{a_j} \int_{t_{j1}}^{t_{j2}} \frac{I}{E + 1} dt. \quad (16)$$

根据 M. E. 别尔梁德 (Берлянд)^[4] 在晴空时总辐射强度 J 的日变化可以用下式表示:

$$J = \frac{S_0 \sin h}{1 + g \sec Z} = \frac{S_0 \sin^2 h}{g + \sin h}. \quad (17)$$

这里 S_0 为大气外界的太阳辐射强度; h 为太阳高度; Z 为天顶距; g 为与大气透明度及下垫面特性有关的参数。

在天空有云时的总辐射强度可以将晴空时的总辐射强度乘以大家熟知的云量订正系数 $\mu = (1 - cn)$, 即

$$J_n = \frac{S_0(1 - cn) \sin^2 h}{g + \sin h}. \quad (18)$$

这里 n 为以十分数所表示的总云量, c 为系数。

因为自然光照强度 I 与总辐射强度 J_n 具有一定比例关系, 所以我们可以将 I 表示为

$$I = \frac{\beta S_0(1 - cn) \sin^2 h}{g + \sin h}. \quad (19)$$

式中 β 为自然光照强度与总辐射强度之间的比例系数。

将(19)代入(16)中, 得到

$$\int_{t_{j1}}^{t_{j2}} \frac{I e^{-a_j k N \bar{A}_j}}{1 + a_j I e^{-a_j k N \bar{A}_j}} dt = \frac{1}{a_j} \int_{t_{j1}}^{t_{j2}} \frac{dt}{E(g + \sin h) + \beta S_0(1 - cn) \sin^2 h}. \quad (20)$$

因为通常作物层下的透光率 (即 $e^{-a_j k N \bar{A}_j}$) 不小于 0.1, a_j 的量级为 $10^{-1} - 10^{-2}$, 即 $E (= e^{a_j k N \bar{A}_j} / a_j)$ 的量级大致是 $10^2 - 10^3$, 而大气外界的光照强度 βS_0 的量级为 10^5 , 在中低纬度地方 c 平均为 0.65, n 平均不超过 0.6, g 大致为 0.1, 所以当太阳高度 $h > 5^\circ$ 时 (约相当于日出后或日没前 10—30 分钟), $\beta S_0(1 - cn) \sin^2 h$ 至少要比 $E(g + \sin h)$ 大一个量级。如果不考虑在太阳高度 5° 以下很短时间的影响, 我们可以将(20)右端的积分

近似地写为

$$\frac{1}{a_i} \int_{t_{i1}}^{t_{i2}} \frac{dt}{1 + \frac{E(g + \sin h)}{\beta S_0(1 - cn) \sin^2 h}} \approx \frac{1}{a_i} \int_{t'_{i1}}^{t'_{i2}} \left[1 - \frac{E(g + \sin h)}{\beta S_0(1 - cn) \sin^2 h} \right] dt. \quad (21)$$

式中 t'_{i1} 和 t'_{i2} 分别代表在日出后和日没前太阳高度等于 5° 的平均时间。

根据天文学, 太阳高度 h 与太阳赤纬 δ 、太阳时角 ω 及地理纬度 φ 具有下列联系:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega. \quad (22)$$

以此代入(21)中, 并将时间的微分 dt 改换为时角的微分 $d\omega$, 即得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_i} \int_{t_{i1}}^{t_{i2}} \frac{dt}{1 + \frac{E(g + \sin h)}{\beta S_0(1 - cn) \sin^2 h}} &= \\ &= \frac{\tau}{2\pi a_i} \int_{-\bar{\omega}'_i}^{\bar{\omega}'_i} \left[1 - \frac{E(g + \sin \varphi \sin \bar{\delta}_i + \cos \varphi \cos \bar{\delta}_i \cos \omega)}{\beta S_0(1 - cn)(\sin \varphi \sin \bar{\delta}_i + \cos \varphi \cos \bar{\delta}_i \cos \omega)^2} \right] d\omega, \end{aligned}$$

这里 τ 为一天的时间长度; $\bar{\delta}_i$ 为在第 i 个生长期中的平均太阳赤纬; $-\bar{\omega}'_i$, $\bar{\omega}'_i$ 为在该生长期中早晨和傍晚太阳高度等于 5° 的平均时角。

在两极圈以内 ($|\sin \varphi \sin \delta| < |\cos \varphi \cos \delta|$) 上式积分的结果是

$$\frac{1}{a_i} \int_{t_{i1}}^{t_{i2}} \frac{dt}{1 + \frac{E(g + \sin h)}{\beta S_0(1 - cn) \sin^2 h}} = \frac{\tau}{\pi a_i} \left[\bar{\omega}'_i - \frac{EX}{\beta S_0(1 - c\bar{n}_i)} \right]. \quad (23)$$

其中 \bar{n}_i 为在第 i 个生长期中的平均云量, X 代表下列函数:

$$\begin{aligned} X &= \frac{1}{\cos^2 \bar{\delta}_i - \sin^2 \varphi} \left\{ \frac{g \sin \bar{\omega}'_i}{\tan \varphi \tan \bar{\delta}_i + \cos \bar{\omega}'_i} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2(\cos^2 \bar{\delta}_i - \sin^2 \varphi - g \sin \varphi \sin \bar{\delta}_i)}{\sqrt{\cos^2 \bar{\delta}_i - \sin^2 \varphi}} \times \right. \\ &\quad \left. \times \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{1 - \tan^2 \varphi \tan^2 \bar{\delta}_i} \tan \frac{\bar{\omega}'_i}{2}}{1 + \tan \varphi \tan \bar{\delta}_i} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (24)$$

$\bar{\omega}'_i$ 可按下式确定

$$\cos \bar{\omega}'_i = 0.087 \sec \varphi \sec \bar{\delta}_i - \tan \varphi \tan \bar{\delta}_i. \quad (25)$$

将(23)代入(15), 得到

$$\frac{1}{\pi a_i} \left(\bar{\omega}'_i - \frac{EX}{\beta S_0(1 - c\bar{n}_i)} \right) = \frac{\bar{r}_i}{b_i}.$$

将 $E = e^{a_i k N \bar{A}_i} / a_i$ 代回上式可以解出最适宜的种植密度 N_s 如下:

$$N_s = \frac{1}{a_i k \bar{A}_i} \ln \left[\frac{\pi a_i \beta S_0(1 - c\bar{n}_i)}{X} \left(\frac{\bar{\omega}'_i}{\pi} - \frac{a_i \bar{r}_i}{b_i} \right) \right]. \quad (26)$$

或

$$N_s \bar{A}_i = \frac{1}{a_i k} \ln \left[\frac{\pi a_i \beta S_0(1 - c\bar{n}_i)}{X} \left(\frac{\bar{t}_{di}}{24} - \frac{a_i \bar{r}_i}{b_i} \right) \right]. \quad (26a)$$

这里 \bar{t}_{di} 为第 i 个生长期中从早晨太阳高度 5° 到傍晚太阳高度 5° 的平均时长, 可以近似地视为在该期间的平均昼长; \bar{A}_i 实际上是近似地等于单株最大叶面积, 因为在生长

中期作物的叶面积一般都已达到最大限度,在以后的阶段中作物只是生长果实或根块,很少再长叶子了,而 \bar{A}_l 与 N 的关系可由(14)式确定之。同时,因为 $N_s \bar{A}_l$ 代表在最适宜的种植密度下的叶面积系数,所以公式(26a)也可用来确定最适宜的叶面积系数。

由公式(26)和(26a)可以看出: 生长期間的自然光照愈强、白昼愈长、云量愈少以及作物的有效遮光面积($k\bar{A}_l$)愈小,最适宜的栽植密度 N_s 愈大。在单株叶面积相同的情况下(即 \bar{A} 相同),因叶子愈近乎鉛直排列(即 k 愈小),有效遮光面积愈小,所以叶子近乎鉛直排列的植物(如禾本科植物中的小麦、水稻等)的最适宜的种植密度比叶子近乎水平排列的植物大。此外,喜光作物因为 a 小,其最适宜的种植密度也小,耐阴作物因为 a 大,其最适宜的种植密度也大。

現在我們再来研究一下种植密度与緯度的关系。在公式(26)中与緯度有关的数量是 X 和 $\bar{\omega}_j$, 如果取春季(3—5月)的平均太阳赤緯 $\delta = 9^\circ 8'$, 夏季(6—8月)的 $\delta = 19^\circ 42'$, 秋季(9—11月)的 $\delta = -8^\circ$, 冬季(12—2月)的 $\delta = -19^\circ 10'$, 我們算出 X 和 $\bar{\omega}_j$ 的值在各季随緯度的变化如图 11 所示。图中第 I 組曲綫代表 $\bar{\omega}_j$ 的变化, 第 II 組曲綫代表 X 的变化。該图表明, X 的值在各季都随緯度而增大; $\bar{\omega}_j$ 的值在春、夏二季也随緯度而增大,在秋、冬二季則随緯度升高而减小。因此,春、夏作物的 N_s 随緯度的变化比較緩和,秋、冬作物的 N_s 則随着緯度升高迅速减小。

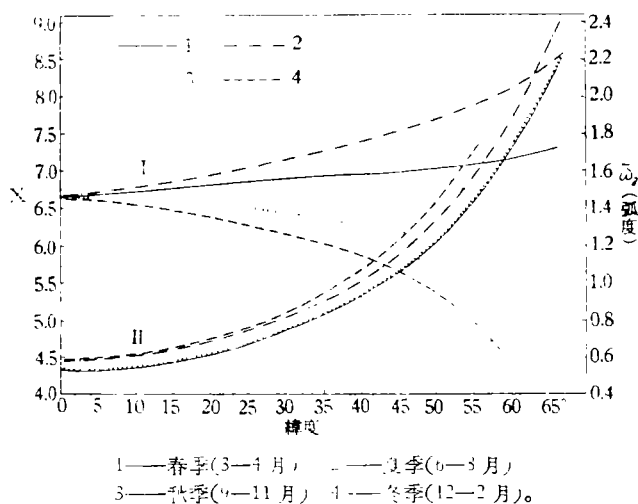


图 11 在不同緯度上和不同季节內 $\bar{\omega}_j$ (I) 和 X (II) 的值

根据殷宏章^[5],对于小麦來說, $a = 0.125 \left(\frac{1}{\text{勒克斯}} \right)$, $b = 0.055 \left(\text{克CO}_2 / \text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{勒克斯} \right)$, 而植物的平均呼吸强度大約是相当于光合强度的 $1/20$ 。据此,如果我們假定 $\frac{a_i \bar{r}_i}{b_i} = 0.006$, 則在公式(26)中整个与緯度有关的数量 $Y = \left(\frac{\bar{\omega}_j}{\pi} - \frac{a_i \bar{r}_i}{b_i} \right) / X$ 在各季随緯度的变化如图 12 所示。該图表明: 在其他条件相同的情况下, 春、夏作物的最适宜的种植密度 N_s 是在自然光照相当强而白昼又比較长的緯度 $20^\circ - 35^\circ$ 之間, 由此再往較高的緯度去, N_s 便逐漸减小。但是秋季作物和特別是冬季作物的最适宜的种植密度則总是随着

緯度增大而迅速地减小。

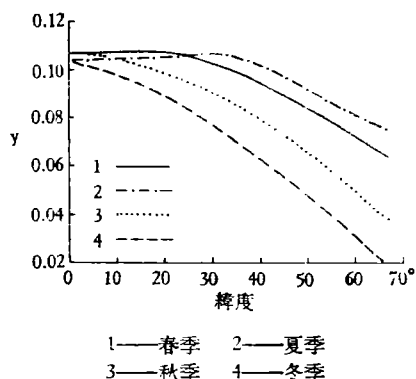
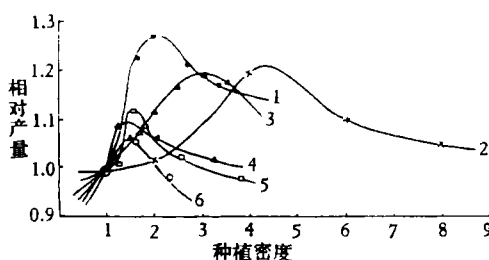


图 12 在不同季节内 Y 值随緯度的变化

如果实际水、肥供应不足,那末最适宜的种植密度也就不能按理論公式确定。由于以上原因,本文所給出的最适宜种植密度公式的重要意义是在一方面証明各种农作物都有一个最大限度的种植密度,决不能无限制地把种植密度增大,另一方面也闡明了农作物最适宜的种植密度与各种因素(气候、地理緯度、栽培季节以及植物叶子的排列和耐阴性等)之間的关系,可供实际設計各种作物合理种植密度的参考,而不在于用它来精确計算最适宜的种植密度(实际上由于情况非常复杂,要从理論上来精确計算是不大可能的)。

图 13 为 1959 年我国各地几种主要作物产量与种植密度的关系。图中横座标为以最小种植密度为单位的种植密度,纵座标为在各种种植密度下的作物产量与最小种植密度下产量的比值或簡称为相对产量。在这个图上清楚地表现了当种植密度开始由小增大时,各种作物的产量都随之增加。但是,当种植密度超过一定限度以后,作物的产量就轉为随种植密度增大而减小。根据我国各地現有的实验資料看来,在水、肥充足的条件下,各种作物的最适宜的种植密度大致如表 3。

不过,正如前面所指出,除光照条件外,温度和湿度也会在不同程度上影响作物的产量。因为各种作物都有它自己所要求的适宜的温度和湿度,而作物田中的温、湿度是随着种植密度及其他各种农业技术措施而变化的,所以在确定要求最高产量的种植密度时,在考虑光照条件的同时,还要注意在一定范围内满足适宜于作物生长发育的温度和湿度条件,或者設法改善在充分利用光照条件下可能附带产生的某些不利的气候因素。此外,本文最适宜的种植密度公式是在水、肥足够供应条件下从充分利用光能的观点出发所导出的。



- 1——冬小麦,最小播种密度 15 市斤/亩(郑州)
- 2——棉花,最小栽植密度 1,000 株/亩(郑州)
- 3——甘薯,最小栽植密度 2,000 株/亩(江苏永兴)
- 4——夏玉米,最小栽植密度 2,500 株/亩(济南)
- 5——高粱,最小栽植密度 4,000 株/亩(沈阳)
- 6——水稻,最小栽植密度 160,000 苗/亩(广东石牌)

图 13 作物产量与种植密度(以最小密度为 1 单位)的关系

(根据河南农业科学院农业气象研究室、河南郑州农业气象试验站,江苏薯类科学研究所,山东农业科学院农业气象试验站,沈阳农学院农业气象专业及广东农业科学院农业气象组、广东石牌农业气象试验站的实验資料绘制)

三、小 結

根据以上分析,我們可以得到下面几点主要結論:

1. 作物田中光照強度的减弱以及在生长期間日平均温度的变化是近似地与种植密度的对数成正比。

表 3 各种作物的最适宜的种植密度

作物	最适宜的种植密度	试 验 地 区
水稻	250,000—500,000 苗/亩	广东石牌, 江西九江、宜春
小麦	30 市斤/亩左右	河南郑州
高粱	6,500—8,500 株/亩	辽宁沈阳
玉米	3,000—4,000 株/亩	山东济南, 山西太原
棉花	4,000—5,000 株/亩	河南郑州
甘 薯	6,000—7,000 株/亩	江苏永兴

2. 作物田中的土壤湿度随种植密度增大而线性地减小, 但空气相对湿度则线性地增大。

3. 当种植密度按等差级数而增加时 ($N, 2N, 3N, \dots$), 则作物田中的风速按几何级数而减弱 ($U_1:U_2: U_3: \dots = E^{-N_1}: E^{-N_2}: E^{-N_3}: \dots$); 换句话说, 即作物田中的风速随种植密度按指数律而递减。

4. 各种作物都有一个最适宜的种植密度 N_s , 在这个密度下作物产量最高, 当种植密度大于或小于 N_s 时, 作物产量都会或多或少地降低。同时, 纬度愈低, 冬季作物的 N_s 愈大, 而叶子近乎铅直排列的植物, 其最适宜的 N_s 也愈大。反之, 叶子愈近乎水平排列的植物, 则 N_s 愈小。

(收稿日期: 1963 年 10 月)

参 考 文 献

- [1] Иванов, Л. А., Фотосинтез и урожай, в сборнике работ по физиол. растений, посвящ. памяти К. А. Тимирязева, М.-Л, изд. АН СССР, 1941.
- [2] Hill, R. and Whittingham, C. P., Photosynthesis. London, Methuen, 1955.
- [3] Michaelis, L., Menten, M. L., Biochem. Z., Biochemische Zeitschrift, band 49, 1913, p. 33.
- [4] Берлянд, М. Е., Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы, Ленинград, 1956, стр. 54.
- [5] 殷宏章等: 小麦群体结构与光能利用, 农业学报, 第 10 卷(1959)第 5 期, 381—396 页。

THE INFLUENCE OF SEEDING DENSITY ON THE MICROCLIMATE

FUH BAW-PUH

(*Department of Meteorology, Nanking University*)

ABSTRACT

On the bases of observation data from various sources, analyses have been made of the influences of seeding density on the microclimate in the crop cover. The main results are as follows:

1. Within the crop cover the decrease in radiation and temperature in the vegetative period is proportional to the logarithm of seeding density.
2. The soil moisture and the relative humidity of the air in the crop cover decrease (the former) or increase (the later) lineally with the increase of density of seeding.
3. The variation of wind velocity with density of seeding can be expressed approximately by this equation:

$$u = u_0 e^{-fN},$$

where U signifies the wind velocity within the crop cover; U_0 the velocity above the crop surface; N the density of seeding and f a parameter.

4. For each crop there is an optimum seeding density that would lead to maximum yield.