

光热资源和农作物的光热生产潜力 ——以河北省栾城县为例*

于沪宁 赵丰收

(中国科学院地理研究所) (中国农业科学院农业气象研究室)

提 要

本文在前人研究成果的基础上, 提出作物光合生产过程可分三个阶段分析其效率和限制因素, 以确定各项参数建立计算方案, 进行温度订正。并以河北省栾城县为例, 计算了小麦、玉米、水稻和不同熟制的光热生产潜力。最后, 对提高光热利用效率的途径进行了探讨。

农作物的光热生产潜力的估算一般均假设环境因素和作物因素都处于最佳状态, 在热量条件允许范围内, 根据光热资源的多寡及群体转换太阳能的效率进行估算。

一、光热生产潜力的基本理论及计算方案

从光能利用估算生产潜力, 是国内外农学和农业气象学者十分关注的问题。竺可桢(1964)^[1]曾指出长江流域单季稻光能利用率如能达到3%则亩产可达2823市斤。1962年日本农业气象学会讨论认为将来水稻产量可比现在的最高产量高10倍^[2]。Loomis和Williams(1963)^[3]利用量子效率等概念进行生物产量生产潜力的估算, 在美国东部夏季每日总辐射500卡/厘米²条件下, 每日每平方米可能的净生产力为77克(包括8%的无机养分)。相当于总辐射利用率的5.3%或光合有效辐射的12%。

本文试将光合生产过程分成三个阶段来剖析, 并提出各个阶段的限制因素, 以建立计算方案。见图1。

第一个阶段是能源和原料的输送阶段。光及二氧化碳通过辐射及扩散进入作物层直达叶绿素内的光合作用反应中心。到达作物层的光能要进行再分配: 一部分反射回空间, 一部分漏射于土面或照射于非光合器官, 群体的密度和株形都影响截获太阳能的多寡。植物收到的光能还要用于蒸腾和乱流热交换。第二阶段是能量转化阶段, 无机物转化为有机物, 光能转化为生物化学潜能。这一阶段的量子效率和光呼吸消耗均影响光合作用效率。近年来的一些研究将光及二氧化碳饱和点和补偿点列为生产潜力的重要因素。第三个阶段为生物化学阶段, 叶子中初步合成的碳水化合物用于生长发育和转运到其他器官中贮藏。Loomis等^[3]的计算方案, 实际上是一、二阶段的生物产量的生产潜力。用于计算禾谷类粮食作物的籽粒产量, 则须乘上经济系数即第三阶段的生产效率。现在我们考虑上述三个阶段中主要影响因素, 建立一、二阶段生物产量光合生产潜力的估算通式。

* 本文于1979年8月25日收到, 1981年7月10日收到修改稿。

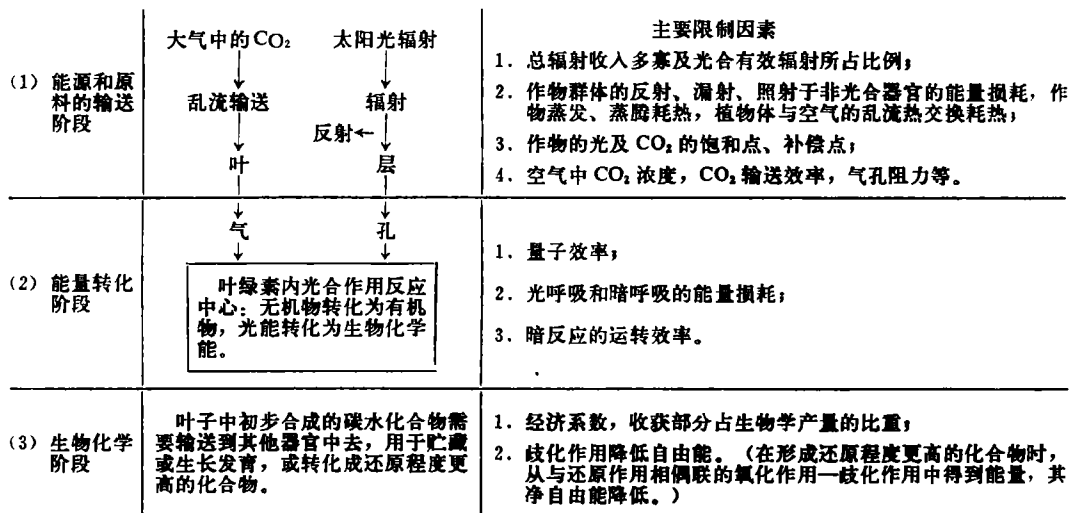


图 1 光合生产过程和限制因素

(1) 光合有效辐射。太阳总辐射中 0.38—0.71 μ 波段的可见光能被光合作用吸收利用, 根据我们的计算华北地区光合有效辐射占总辐射的比例(ϵ)为 0.49。

(2) 反射率(α)。据报导, 光合有效辐射反射率在 4—10% 间, 平均可取 8%。

(3) 漏射率(β)。漏射于土面的光量随不同作物群体及不同发育期而异。计算生物产量光合生产潜力时一般可取平均值为 6%。

(4) 非光合器官的无效吸收(ρ)。一部分太阳辐射被非光合器官或被细胞壁、细胞质和无光合作用的色素所吸收, 据 Loomis^[3]等的资料可取 10%。

(5) 光饱和限制(r)。早期的许多研究认为在较低的光强下即可达到光饱和, 此后的许多研究认为作物的光饱和点较高甚至消失^[4,5]。综合各方面的报导, C₄ 作物不受光饱和和限制, 我们计算生物产量生产潜力时取 $r=0$ 。在计算作物生产潜力时按 C₃、C₄ 作物和不同生育期取不同的数值。

(6) 量子效率(ϕ)。Bonner^[6]指出在高光强下量子需要量为 10 是较稳定的。我们取量子需要量为 10, 1 克分子碳水化合物贮藏 112 千卡, 1 克分子光子能量平均取 50 千卡, 则量子效率取其低值 $112/50 \times 10 = 0.224$ 。

(7) 呼吸作用的损耗(ω)。据报导消耗于呼吸作用的光合产物, 少者 20%, 多者达 40—50%, 甚至更多。Loomis^[3]等取 1/3。在温带农作物平均呼吸损耗为 30%。

设生物产量的光合潜力为 y_p , 太阳总辐射为 Q [卡/厘米²]。每形成 1 克干物质平均需要 4.25 千卡能量, 植物体无机养分约 8%, 则生物产量光合生产潜力的通式可以表示为:

$$y_p = Q \epsilon (1-\alpha)(1-\beta)(1-r)(1-\rho)(1-\omega) \phi \times 4250^{-1} \times (1-0.08)^{-1} \quad (1)$$

以 $\epsilon=0.49, \rho=0.10, \omega=0.30, \phi=0.224$ 代入(1)式则:

$$y_p = 1.769 \times 10^{-5} (1-\alpha)(1-\beta)(1-r) Q [\text{克/厘米}^2] \quad (2)$$

$$\text{以克/米}^2 \text{ 为单位, 则 } y_p = 0.177(1-\alpha)(1-\beta)(1-r) Q [\text{克/米}^2] \quad (3)$$

$$\text{以斤/亩为单位, 则 } y_p = 0.236(1-\alpha)(1-\beta)(1-r) Q [\text{斤/亩}] \quad (4)$$

(4)式可用于估算不同 α, β, r 值的各种作物生物产量的光合潜力。以 $(1-\alpha)=0.92, (1-\beta)=0.94, (1-r)=1$ 代入(4)式, 得 $y_P=1.53 \times 10^{-5}Q$ [克/厘米²]= $0.153Q$ [克/米²]= $0.204Q$ [斤/亩]。总辐射收入为 500 卡/厘米²·日时, 最大干物质产量为每平方米 76.5 克。Loomis^[3,13]等统计了栽培作物的日生产率, 美国加利福尼亚和纽约州的玉米和高粱日生长量已达 51—52 克/米², 澳大利亚的蜡烛稗达 54 克, 可见光能利用率达 9.5%。Davis 的苏丹草日生产率达 51 克。北京郊区小麦亩产 800—1000 斤, 生长盛期光能利用率已达 4—5%。

近年来生产潜力的估算中, 普遍重视热量资源的作用, 需要进行温度订正, 则光热生产潜力的公式可表示为:

$$y_{P_i} = f_i \cdot y_P \quad (5)$$

y_{P_i} 为光热生产潜力, f_i 为温度订正函数。

二、光热资源与农作物的光热生产潜力

1. 生物产量的生产潜力

图 2 为栾城县光热资源年内分配曲线, 总辐射用气候计算法求取。表 1 为我们用

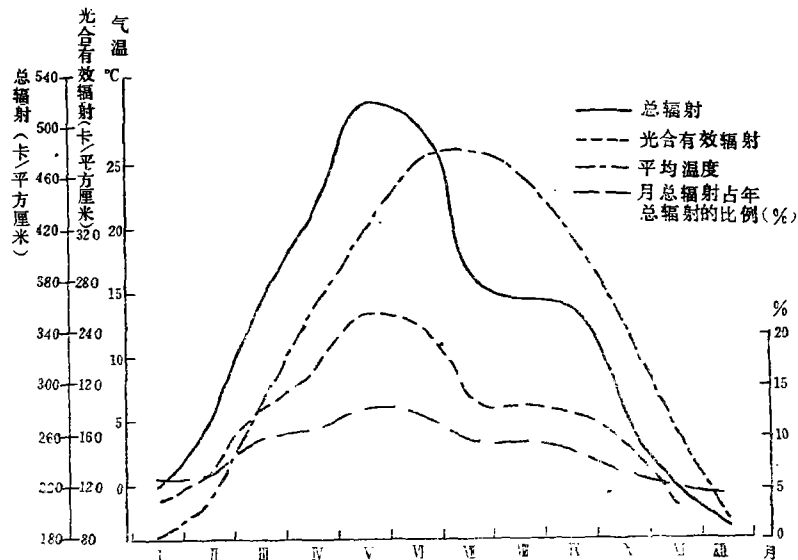


图 2 栾城县的光热资源

$y_P=0.153Q$ [克/米²]及 $y_P=0.204Q$ [斤/亩]计算的光合生产潜力。光合生产潜力 5 月份最高, 其次为 6 月份。8、9 月份生产潜力甚至低于 4 月份。6 月份比 7 月份日生产潜力高 24.9 斤/亩, 表明下茬作物争时抢播是十分重要的。12、1、2 月份气温在零度以下, 从长远看可发展温室栽培以利用这部份光能资源。

我们根据长谷川史郎·奥田明男^[7]的 C_3, C_4 作物大量实验资料求得相对光合速率 (P_i) 与温度 (t) 的实验式, 来表征温度订正函数 f_i 。

$$f_i = P_i = 4.301 \times 10^{-2}t - 5.771 \times 10^{-4}t^2 \quad (6)$$

表1 光合生产潜力与光热生产潜力

项目	单位	月份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
总辐射收入	月总量 (卡/厘米 ²)	6862.8	7506.7	11368.1	12963.8	16069.6	15222.8	11947.4	11388.2	10855.1	8647.5	6620.6	5984.2
	日平均 (卡/厘米 ²)	221.4	266.1	366.7	432.1	518.3	507.4	385.4	367.4	361.8	279.0	220.7	193.0
光合生产潜力	月(斤/亩)	1400.0	1531.4	2319.1	2644.6	3278.2	3105.5	2437.3	2323.2	2214.4	1764.1	1350.6	1220.8
	日(克/米 ²)	33.9	40.7	56.1	66.1	79.3	77.6	59.0	56.2	55.4	42.7	33.8	29.5
光热生产潜力	P_i	0.0	0.0	0.3597	0.5782	0.6778	0.7537	0.7529	0.7359	0.6764	0.5492	0.3125	0.0
	月(斤/亩)	0.0	0.0	834.2	1529.1	2221.9	2340.7	1835.0	1709.8	1497.9	968.8	422.1	0.0
	日(克/米 ²)	0.0	0.0	20.2	38.2	53.7	58.5	44.4	41.4	37.5	23.5	10.6	0.0

t 以 14, 20 时气温代表光合作用进行时的温度。光热生产潜力 $y_{P_i} = P_i \cdot y_P$, 代入(4)式则:

$$y_{P_i} = 0.236(1-\alpha)(1-\beta)(1-r)Q \cdot P_i [\text{斤/亩}] \quad (7)$$

以 $y_{P_i} = 0.153Q \cdot P_i$ [克/米²] 及 $y_{P_i} = 0.204Q \cdot P_i$ [斤/亩] 计算得各月光热生产潜力, 亦列于表 1。可见生物产量的光热生产潜力 6 月份最高, 其次为 5 月份, 冬季三个月为零。

2. 几种主要作物的光热生产潜力

(1) 冬小麦的生产潜力。冬小麦生育期光合有效辐射、温度、叶面积变化见图 3。根据群体结构及干物质积累特征可分成三个阶段来计算。

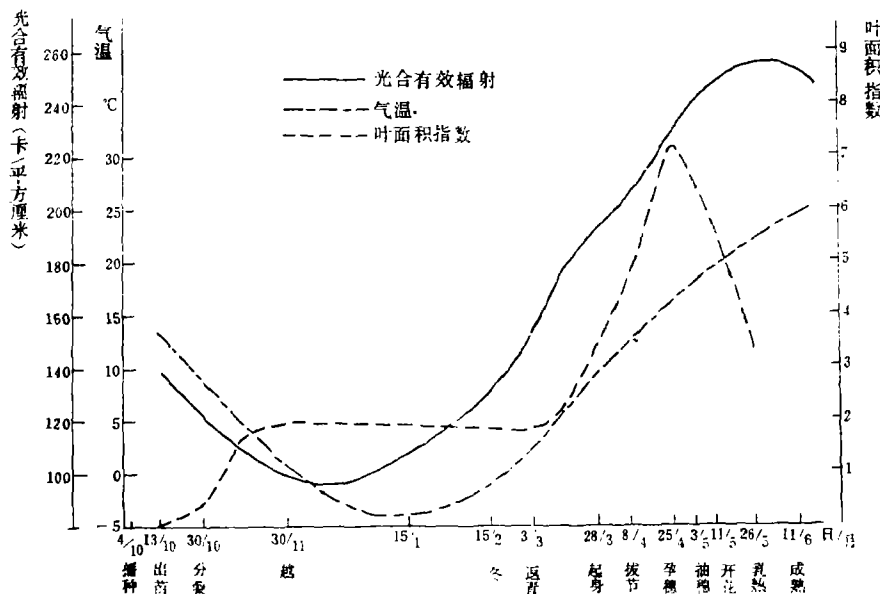


图3 冬小麦生育期的光热资源和叶面积变化

第一阶段: 出苗至拔节期。出苗期平均 10 月 13 日, 次年 4 月 5—7 日拔节。此期间

总辐射 27.0 千卡/厘米², 光合作用平均温度 7.7°C, 按(6)式得 $P_t=0.297$ 。(越冬期辐射收入和温度均不计)出苗和返青后叶面积很小, 所以反射率接近裸地反射率, 取 $\alpha=15\%$ 。漏射率极大, 平均 $\beta=50\%$ 。苗期 C_3 作物光饱和点低, Evans(1975)^[8]指出小麦约在全日光的 1/3—1/2 光强处即达光饱和, 我们取 $r=1/3$ 。上述数值代入(7)式可得生物产量:

$$y_{P_t}=0.236(1-0.15)(1-0.50)(1-1/3) \times 27000 \times 0.297=536.2[\text{斤/亩}]。$$

第二阶段: 拔节开花期。从 4 月 7 日至 5 月 10 日, 总辐射 15.443 千卡/厘米²。反射率降低为 10%。平均漏射率为 10%。日本学者提出抽穗前后光饱和点消失^[9], 我们取 $r=0$ 。光合作用平均温度 19.66°C, 按(6)式得 $P_t=0.6225$, 按(7)式得 $y_{P_t}=1837.7$ 斤/亩。

第三阶段: 开花成熟期。从 5 月 11 日至 6 月 10 日, 总辐射 16.816 千卡/厘米²。 α 按 10% 计, 平均漏射率按 15% 计。此期间总辐射强度均大于 500 卡/厘米²·日, 据报导光强在 500 卡/厘米²·日时水稻和小麦因超过光饱和损失光能达 36%^[8], 我们取 $r=0.36$ 。光合作用平均温度为 24.6°C, 按(6)式得 $P_t=0.7088$, 按(7)式得 $y_{P_t}=1377.2$ 斤/亩。

三个阶段生物产量总干重为 3751.1 斤/亩, 含水率一般为 14%, 则生物产量为 4361.7 斤。华北平原冬小麦的经济系数一般在 0.27—0.35 间。河北省农科院调查, 如欲获得 600 斤以上的亩产量, 经济系数不能低于 0.36, 亩产千斤以上的经济系数不低于 0.44, 设经济系数分别为 0.36, 0.40, 0.44 时, 经济产量分别为 1570.2 斤/亩、1744.7 斤/亩和 1919.2 斤/亩。

(2) 玉米的光热生产潜力。按有关文献^[3, 5]中的数据, 结合栾城实际资料, 将各项参数列于表 2, 按(7)式计算得夏玉米生物产量 3866.9 斤/亩, 含水率为 14% 则为 4496.4 斤。经济系数 0.4 时亩产 1798.6 斤。一季玉米亩产 2705.2 斤。这与美国估算玉米带理想产量大致一致^[10]。

表 2 玉米各生育期的各项系数和生产潜力

熟制和生育期 系数和生产潜力	夏 玉 米			一季玉米 (20/5—20/9)
	出苗—拔节 (20/6—17/7)	拔节—抽丝 (18/7—13/8)	抽丝—成熟 (14/8—20/9)	
太阳总辐射(卡/厘米 ²)	12228.6	9689.8	12534.7	52016.3
α	0.15	0.06	0.10	0.08
β	0.60	0.10	0.10	0.30
γ	0	0	0	0
光合作用平均温度(°C)	28.4	27.7	24.0	26.6
P_t	0.7560	0.7486	0.6998	0.7357
生物产量(斤/亩)	741.8	1448.3	1676.8	5816.2
	全生育期 3866.9			

(3) 水稻的生产潜力。近年来一般均用经济器官形成期辐射收入来计算水稻生产潜力, 因为最高产量界限取决于产量形成期的光合作用产物的数量, 实验证实成熟之前 30—45 天太阳辐射对产量有重大影响^[11]。我们取 $\alpha=0.10$, $\beta=0.10$, $\rho=0.10$, $\gamma=0.20$, $\omega=0.30$, $\phi=0.224$, 穗部容纳的光合产物开花后占 2/3, 其余为开花前贮存于茎叶中的

产物转移而来。籽粒中含有灰分 1.4%，颖壳(开花前形成的)占谷重的 1.9%。含水率 14%。光合作用平均温度 24.6°C, $P_i=0.7088$ 。抽穗前 10 天到抽穗后 30 天的辐射总量为 14.584 千卡/厘米², 则一季稻产量为:

$$y_{P_i} = 14584 \times 0.49(1-0.1)(1-0.1)(1-0.1) \times 0.224(1-0.20)(1-0.30) \left(\frac{2}{3}\right)^{-1} \\ (1-0.014)^{-1}(1-0.019)^{-1} \times 666.7 \times 10^4 \times 4250^{-1} \times 500^{-1}(1-0.14)^{-1} \times \\ 0.7088 = 2620.5 \text{ 斤/亩}$$

考虑到如果取抽穗后 30 天的光合产物为宜, 则亩产 1965.3 斤/亩, 相当于生育期短的品种的生产潜力。麦茬稻取开花到成熟期有效光合作用时期一般为 25 天, 则亩产 1637.8 斤/亩。

(4) 种植制度的光热生产潜力的比较。由表 4 知, 小麦玉米两熟制的生产潜力, 当玉米经济系数 0.40 时, 小麦经济系数分别为 0.36, 0.40, 0.44 时, 全年产量分别为 3368.8 斤/亩、3543.3 斤/亩、3717.8 斤/亩, 均高于一季玉米的生产潜力 2705.2 斤/亩和一季水稻的生产潜力 2620.5 斤/亩。小麦水稻两熟制的生产潜力小于小麦玉米两熟制的生产潜力, 但高于一季水稻的最高可能产量, 一季水稻的生产潜力高于小麦生产潜力。当经济系数达到 0.44 时, 一季小麦生产潜力高于夏播玉米和夏播水稻的生产潜力。

表 3 不同作物的生产潜力 (斤/亩)

小 麦		玉 米		水 稻	
0.36	1570.2	夏 播 玉 米		夏 播 水 稻	
0.40	1744.7	0.40	1798.6	1637.8	
0.44	1919.2	一 季 玉 米		一 季 水 稻	
		0.40	2705.2	2620.5	
				1965.3	

三、提高农作物光热利用效率发挥生产潜力的途径

Bassham(1977)^[12]指出陆生植物最旺盛生长季所期望的上限效率是 6.6%。Cooper^[13]指出在太阳辐射和水份丰富及其他条件适宜的情况下, 实际生产力仅为理论生产潜力的一半左右。栾城县目前产量水平下, 小麦、玉米、水稻亩产千斤, 全生育期平均生物产量光能利用率约 2.73%。这是光合生产过程中各项因素共同限制的结果。要达到或接近理论生产潜力, 应从环境因素和作物因素挖掘生产潜力。

(1) 继续改善和创造适宜于农作物生长的生态环境条件。农作物的光合生产是从太阳辐射取得能量的绿色动态受光体系, 要高效地转换太阳能就必须创造最佳条件, 这是提高光热利用效率发挥生产潜力的基础和前提。

(2) 复种是提高光热资源利用效率的有效途径。据估算, 两熟制的生产潜力均大于一熟制, 权衡光、热、水诸因素后认为栾城耕作制度应向两茬平作方向发展, 亦应保留一定比例的一年一熟制, 作为两年三熟的轮作倒茬作物, 且生产潜力也是相当大的。下茬应抢时播种。

(3) 培植高光能利用效率的群体结构。农作物的产量是茎叶密度的生产力，要高产必须在田间培植高光能利用率的群体结构，使叶丛受到光饱和点以下光补偿点以上的中等光强；通过“促”、“控”等措施，注意调节贮存器官——“库”和进行光合生产的“源”器官之间的关系^[8]，使初步合成的碳水化合物尽量转运到需要收获的器官中去。一些研究报告指出，高产情况下如欲继续高产，还须相应调整养份运转，即提高经济系数。矮秆有利于合理密植，提高经济系数，以提高光合生产第二阶段到第三阶段的能量转换效率。当然植株不宜太矮，否则容纳不下多少叶面积，产量容器也不大。

(4) 其他途径。高光效育种，二氧化碳施肥，化学药剂抑制光呼吸消耗，发展温室和保护地栽培，适当扩种在土壤、水层、空气三态环境下易创高产的作物，以及育苗移栽等，都是值得进一步探索的提高光热利用效率的途径。

参 考 文 献

- [1] 竺可桢，论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系，科学通报，第3期，1964。
- [2] E. Inoue, Ymihara, and Y. Tsubot, Agrometeorological studies on rice growth in Japan, *J. Agric. Met. International*. 2, 1965.
- [3] Loomis, R. S., and W. A. Williams., Maximum crop productivity: An estimate, *Crop. Sci.* 3(1), 1963.
- [4] Blackman, G. E., 和 J. N. Black, 植物环境分析中生理生态研究, XII. 光因素在限制生长中的作用。《作物产量变异的生理基础译文集》，科学出版社，1965。
- [5] Moss, D. N., and R. B. Musgrave., Photosynthesis and crop production, *Adv. Agron.* 23, 1971.
- [6] Bonner, J., The upper limit of crop yield, *Science*, 137, 1962.
- [7] 长谷川史郎·奥田明男, C₃植物とC₄植物に関する農業気候学の研究, *農業気象*, 32(4), 1977.
- [8] Evans, L. T., *Crop physiology*, Univ. of Cambridge press. 1975.
- [9] 卢莉义茨等主编, 植物生理学讲座(5), 呼吸作用与光合作用, 上海科学技术出版社, 1965。
- [10] Duncan, W. A., Cron yield to meet the challenge, in *Maximum crop yields—The challenge*, Am. Soc. of Agron, 1967.
- [11] Robertson, G. W., and G. A. de Weille., Rice and Weather, WMO, Bull. Vol XXII, Nol, 1973.
- [12] Bassham, J. A., Increasing crop production through more controlled photosynthesis, *Science*. 197, No. 4304, 1977.
- [13] Cooper, J. P., Photosynthesis and productivity in different environments, Univ. of Cambridge press. 1975.

**ON THE LIGHT AND THERMAL RESOURCES AND
THE CROP POTENTIAL PRODUCTIVITY—TAKING
LUANCHENG COUNTY OF HEBEI PROVINCE AS
AN EXAMPLE**

Yu Hu-ning

(Institute of Geography, Academia Sinica)

Zhao Feng-shou

(Laboratory of Agrometeorology, Chinese Academy of Agricultural Sciences)

Abstract

The process of photosynthetic production of crop is divided into three steps for analysing their limiting factor and photosynthetic efficiency. On this basis, the parameters are determined and a calculation scheme is established, meanwhile the temperature correction being made. Taking Luancheng as an example, the potential productivities of wheat, maize, rice and for different cropping system have been investigated. Finally, some measures for increasing the potential productivity and the efficiency of utilization of light and heat are discussed.