南京气象学院学报
一九八五年　第一期

冬小麦群体的光能利用率*

谈红宝

提　要

本文通过生长分析法与农田小气候方法相结合的途径，研究了小麦群体的光能利用率和能量转换效率随生育期的变化过程以及它们之间的相互关系；提供了用光能利用效率定量分析栽培措施产量效应机理的实例。文中对现在通用的只使用理想数值计算小麦光能利用率的方法提出了改进意见。试验表明：小麦群体的光能利用率随生育期变化的曲线呈双峰型，抽穗期出现极小值；同样的经济产量所相应的光能利用率，南方的大于北方的；施肥措施的产量效益是群体的能量转换效率、反射率和农田植被覆盖度三个因子在施肥措施的作用下对光能利用率综合影响的结果。

一、引　言

植物在光合作用中所贮存的能量是地球上所有生物维持生命的直接或间接的能量来源。人们为了提高作物光合作用的效率，进行了多方面的研究。其中包括对农作物将太阳能转变成化学潜能的效率的研究。这方面的研究有两大类：一类是使作物处于理想条件之下，计算其对太阳辐射能的利用率，进而研究产量上限；另一类是对生育期中能量消长规律及介于产量之间的各种效率进行研究。理想条件下的产量界限为人们提供了努力的目标。耕作栽培措施影响光能利用率的规律的研究将为达到理想产量的途径提供依据。七十年代以前，作物光能利用的计算和研究多以作物全生育期辐射总量和产量为基础；七十年代后半期以来，划分生育期进行的研究渐多[1][2]。王亨等(1979)[2]对小麦孕穗期以前各生育期的光能利用率进行的研究表明，拔节—孕穗期出现高峰。北京市农业科学院农业气象研究室(1975)[1]对冬麦生育中后期(起身以后)的光能利用率的研究表明：光能利用率有两个高峰；生长盛期到产量形成期，全株干物质的光能利用率达到每日总辐射量(500卡·厘米$^{-2}$)的3—5%是创高产的关键。他们的工作提供了北方冬麦区灌溉条件下冬麦群体光能利用率随生育期变化的过程。南方冬麦群体的能量利用率有多大？南、北方冬麦群体光能利用率随生育期的变化过程是否相同？不同栽培措施下群体的光能利用

*本文于1984年7月12日收到，1984年11月5日收到修改稿。

率有什么差异？这些都是有待解答的问题。

为了深入研究太阳辐射能向作物的化学能转化的过程，必须把农学上常用的生长分析法与农田小气候方法结合起来。生长分析法自格雷戈里(Gregory，1917)和布莱克曼(Blackman，1919)提出以来，已被广泛使用並成为作物栽培和育种研究的强有力的武器。用农田小气候方法、从群体反射率着手估算麦田的短波辐射收入量的工作也早在本世纪三、四十年代开始进行。拉依哈特曼(Лайхтман,Д. Л.,1949)和加里彼里(Гальперин,Б.М.,1949)[3]，鲁辛(Русин,Ц.П.,1953—1954)[11]等的工作就是典型。六十年代蒙蒂斯(Monteith,J.L.,1959)和弗里特索(Fritchen，1967)只测定过个别生育期的短波辐射反射率[10]。国内这方面的研究只见到五十年代殷宏章等(1959)[4]用自制光电池测定小麦群体乳熟期的反光率(原文为光合有效辐射反射率)的报导。近三十年来，辐射仪器改进很大；小麦品种、栽培技术也变化很大。当前生产水平下小麦群体的反射率究竟是多少？本文试图借农田小气候方法找出问题的答案，並将它们用到栽培措施的增产机理分析中去。

试验于1981—1982年在南京农学院试验田内进行。试验田的地理位置是：北纬32°00′，东经118°48′。

二、试验材料和方法

试验分高肥和低肥两种处理。高肥田面积1.1亩，低肥田面积0.13亩。田块附近有房屋和树木，远处有低山遮蔽。小麦生育期间，日出日落方向的遮蔽角为1°12′—12°07′。

高肥田施肥量折合纯氮40斤/亩，低肥田施氮肥折合纯氮20斤/亩。两种处理的其余栽培措施均相同：前作为水稻；供试品种为当地使用的高产品种宁麦3号；播期为10月31日；播种方式为条播，基本苗12—13万。低肥田出苗率较低，在三叶期至分蘖初期移栽补齐。高肥田在分蘖期曾有轻微冻害、拔节期出现局部倒伏。

高肥田籽粒产量为640斤/亩；低肥田为566斤/亩。

辐射观测仪器为苏制杨尼舍夫斯基式天空辐射表、反射率表和沙文诺夫—杨尼舍夫斯基相对日射表。使用前均经中央气象局检定。仪器安装和测定均按日射观测规范进行。

生长期中进行三项小麦的生物学测定：各生育期始日用烘干法测定干重；各生育期普遍期前后用日射实测棒测定农田植被覆盖度(即地面上荫影面积所占的份数)。于典型晴日反射率观测的当日或次日，测定总叶面积指数。考虑到反射率与黄叶叶面积有关，总叶面积指数包括黄叶叶面积。单叶叶面积＝0.83×叶长×叶宽。物候观测均参照农业气象观测规范进行。

三、试验结果分析

(一)冬小麦群体光能利用率随生育期的变化

单位面积土地上植物累积的干物质中贮存的热能与同期到达群体的太阳辐射能总量的百分比为光能利用率，可表示为

$$E_u = \frac{H \cdot \Delta W}{\Sigma Q} \times 100\% \qquad (1)$$

式中H为1克干物质的燃烧热，这里取4.25千卡·克$^{-1}$；ΔW为某时期内干物质增量(克·米$^{-2}$)；ΣQ为同期到达麦田的短波辐射总量(千卡·米$^{-2}$)。

表 1 小麦群体各生育期的干物质增量ΔW(克·米$^{-2}$)和光能利用率E_u(%)

群体型	项目	生育期(始期)							
		出苗	三叶	分蘖	拔节	抽穗	乳熟	蜡熟	完熟
Ⅰ型	ΔW		4.50	3.04	292.6	670.7	191.9	703.0	77.9
	E_u			0.05	0.66	2.69	1.74	3.83	0.97
Ⅱ型	ΔW		5.04	4.32	334.8	846.0	347.4	648.0	64.8
	E_u			0.11	0.75	3.25	2.15	3.59	0.88

试验得到当前生产水平下(施纯氮20斤/亩)的小麦群体(以下简称Ⅰ型)各生育期的光能利用率为三叶期0.05%；分蘖期0.66%；拔节期2.69%；抽穗期到开花期1.74%；乳熟期3.83%；蜡熟期0.97%。由图1可见高肥群体(以下简称Ⅱ型)的光能利用率随生育期的变化曲线和Ⅰ型一样呈双峰型，即三叶期至拔节期渐升，拔节期有第一极大值，抽穗期和开花期有极小值；乳熟期有第二极大值。这种变化过程主要决定于小麦群体的光合能力和呼吸能力的变化特点。群体的光合能力随生育进程的变化曲线呈单峰型，峰值出现在开花期[5][6]。它的呼吸能力随生育进程的变化也呈单峰型，峰值出现在开花期或略早[5]。本试验中，抽穗期恰遇连续阴雨，4月22日至29日这八天中有三天直接辐射量为0.0，其余五天的云量也很多，辐射强度很小。这种情况下群体的同化作用很弱，干物质积累相对较少。此外小麦旗叶的光合速率在叶片充分扩展时达到最高，之后下降。当籽粒迅速生长对有机营养需求增加时又显著上升[9]。抽穗—开花期恰处于旗叶光合速率较低时期。由于上述原因，光能利用率曲线在此期出现极小值。

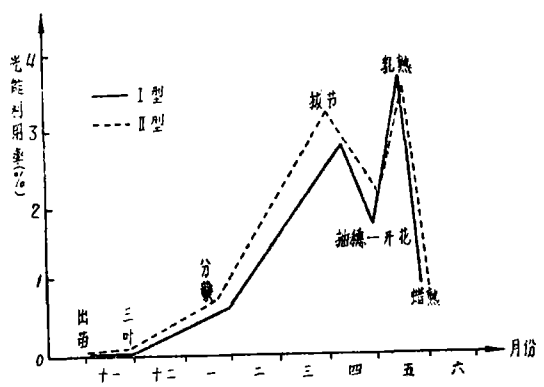

图 1 小麦群体光能利用率的变化过程

我们引用文献[1]对小麦光能利用的研究结果进行分析，所得结果与上述基本一致。在他们的研究中，六个小麦群体的光能利用率随生育期变化的曲线均具有双峰，分

别出现在抽穗之前和之后。据此，笔者认为，无论是北方冬麦还是南方冬麦，其光能利用率随生育期变化的曲线均呈双峰型，极小值出现在抽穗期。

(二)施肥措施与冬小麦群体光能利用率

单位面积土地上某一时期内形成的干物质中所贮存的能量 $H\cdot\Delta W$ 还可以用下式表示

$$H\cdot\Delta W=[\sum Q\cdot a]E_c \qquad (2)$$

式中H、ΔW和$\sum Q$的意义同(1)式；a为群体吸收率；E_c为能量转换效率，它是单位面积土地上植物积累的干物质中贮存的热能与同期内植物体吸收的辐射量之比。

1.冬小麦各生育期的能量转换效率E_c随生育期的变化

能量转换效率E_c随生育期变化的曲线在分蘖期出现第一个极小值(图2)。三叶期E_c高于分蘖期的原因是植株在三叶期可自种子的胚乳获得建造植株体的养分，加上这个生育期间天气晴好，气温亦不太低(日平均气温为6—10℃，日最高气温10℃左右)，因而表现出较高的能量转换效率。分蘖期以后，E_c上升，拔节期出现第一个极大值。抽穗—开花期有明显的极小值，乳熟期出现第二极大值。I型群体各生育期的E_c为三叶期2.38%；分蘖期2.01%；拔节期4.26%；抽穗—开花期2.41%；乳熟期5.18%；蜡熟期1.38%。

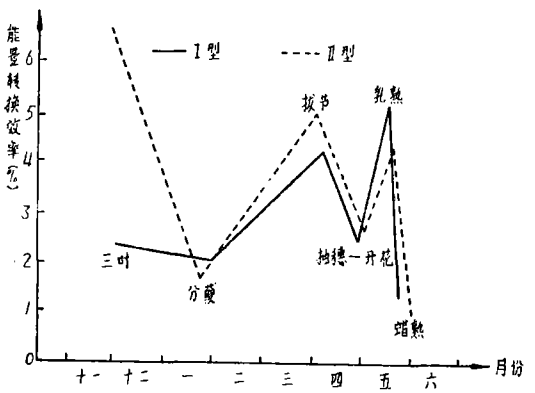

图 2 冬小麦群体能量转换效率随生育期的变化

比较图2中两个群体的E_c曲线可见，抽穗—开花期之前，II型的E_c高于I型，而开花期以后的各生育期中，II型E_c均低于I型。II型群体在分蘖后期和拔节期施肥过多，又遇多雨，植株处于水肥充足的条件下，因此这两个生育期的E_c较高；但是过茂的营养生长使群体的光合条件日趋恶化，下部叶片因光照不足和通风不良造成的CO_2亏缺而过早凋萎[7]；植株因吸收氮素过多，大量的碳水化合物消耗于叶片的合成作用，而输往麦粒的碳水化合物显著减少。这种有机物输送受阻的情况使叶片的光合速率不能维持原有水平，E_c必然下降。因此，后期E_c下降是由分蘖后期至拔节期追肥不当引起的。

三叶期间I型E_c显著低于II型是由于移栽缓苗。

2.施肥措施与光能利用率

若以r表示群体反射率，那么(1－r)为进入群体的辐射通量占投射到群体上方的辐射通量的份数。对到达通量为$\sum Q$的直接辐射来说，$[a\cdot\sum Q]$与$[(1-r)\cdot\sum Q]$之比应等于农田地面上荫影面积所占的份数—农田植被覆盖度f，因此有

$$f=\frac{a\cdot\sum Q}{(1-r)\sum Q}=\frac{a}{1-r} \qquad (3)$$

将$a=f(1-r)$代入(2)式得

$$H \cdot \Delta W = \sum Q \cdot f \cdot (1-r) \cdot E_c \qquad (4)$$

比较(1)和(4)式可知

$$E_u = f \cdot (1-r) \cdot E_c \qquad (5)$$

可见E_u的大小除与E_c有关外，还与f及(1—r)有关。为了摸清E_u的变化规律，我们对各生育期的反射率和覆盖度进行了测定和分析。试验表明，整个生育期内反射率的变化是由小变大，拔节期出现最大值，之后又下降(表2)；II型群体的反射率显著大于I型。

表 2　冬小麦群体各生育期的平均反射率(%)

生育期		苗期	三叶	分蘖	拔节	抽穗|开花	乳熟	蜡熟	出苗|完熟
群体型	I	—	11.3	14.6	18.3	18.3	15.3	14.0	15.4
	II	14.5	15.2	16.3	24.6	21.1	16.4	12.9	18.4

II型反射率高是由于肥水多，叶面积指数高(表3)；叶子平铺甚至还有部分披叶。由于E_u与r呈反相关，II型群体反射率对E_u的负作用大于I型。

表 3　小麦群体的总叶面积指数(包括黄叶叶面积)

日期(日/月)		18/11	28/11	11/12	25/12	25/2	11/3	22/3	8/4	15/4
群体型	I	—	—	0.22	0.23	0.72*	3.48	3.84	5.83	7.20
	II	0.02	0.19	0.28	0.33	2.46	5.23	—	8.49	10.24

注：*指本值测定日期为2月20日。

由(5)式可见，E_u与农田植被覆盖度f成正比。II型群体由于肥水多、营养生长茂

表 4　不同群体的r、f和E_c(%)

项目＼生育期		三叶	分蘖	拔节	抽穗|开花	乳熟	蜡熟
I型	r	11.3	14.6	18.3	18.3	1.53	1.40
	f	2.2	38.2	81.9	88.3	87.3	81.4
	E_c	2.38	2.01	4.26	2.41	5.18	1.38
II型	r	15.2	16.3	24.6	21.1	16.4	12.9
	f	1.9	51.4	85.8	100.0	99.2	98.3
	E_c	6.68	1.74	5.03	2.72	4.33	1.03

盛，整个生育期的 f 始终高于 I 型(表4)。因此可以认为，由f引起的E_u增加是施肥措施的后效之一。

综上所述，肥水过多不但从多方面影响施肥当时的E_u，而且通过覆盖度影响后期的E_c。试验中，小麦生育前期的E_c和 f 均以II型为高，仅 f 一项就高了 10% 左右，而II型的r只比 I 型高2—6%，三因子综合结果，II型的E_u比 I 型高了20%(I 型为1.32%；Ⅱ型为1.58%)。但开花到成熟期情况就不同。尽管此期两型间 f 的差异维持前期的差异，而且II型的反射率下降比 I 型迅速，f 和 r 这两个因子的综合作用应是使 II 型群体维持前期的优势。然而试验结果恰恰相反，后期的E_u II 型比 I 型低 5%(开花到成熟期间平均E_u I 型为2.96%； II型为2.81%)。究其根源是 II 型的 E_c 太低。施肥过多对E_u的负反馈作用使II型群体的光能利用率具有营养生长期高、籽粒灌浆期低的特点。许多学者对籽粒形成规律的研究表明，籽粒中的有机物质主要由抽穗以后的光合作用形成[8][9]。II型群体E_u的这种特点对籽粒产量的提高是不利的。本试验中II型群体的施氮量是 I 型的两倍，但籽粒产量却只比 I 型高13%就是例证。这种施肥措施的经济效益是低下的。

(三)气候条件与冬小麦群体光能利用率

由E_u的定义可知E_u的大小取决于ΔW和ΣQ两个因子。品种、气温、降水、病虫害及栽培措施等要素均影响干物质增量，因而干物质增量的大小体现了上述诸因素的综合影响。在籽粒产量相同的前提下，E_u的差异是由辐射条件差异引起。以本试验作为南方冬麦典型，引用文献[1]的试验结果作为北方冬麦的典型。比较它们的光能利用率，我们得出结论：在经济产量相近的前提下，南方冬麦群体光能利用率高于北方(表5)。根

表 5 不同地区冬麦群体光能利用率

田块		全生育期日射总量($\times 10^4$千卡/亩)	亩产(斤)	总干物重(斤/亩)	能量利用率(%)	
					籽实	总干物质
北京许家务大队	村南稻茬地	41714.4	550.1	2260.5	0.28	1.15
	三队白塔晚播	41714.4	537.5	1792.5	0.27	0.90
	二队庙后	41714.4	670.2	1296.0	0.34	1.17
南京农学院	I 型	34913.6	566	2609.5	0.34	1.59
	Ⅱ 型	35743.7	640	3000.2	0.38	1.78

据作物的光—光合特性，辐射强度达到一定水平但又不过高的条件下，作物光合强度大，光饱和损失少。南方符合这个条件。另外，在叶面生长时期内，相对较小的辐射强度有利于叶面扩展，尤其在有充沛雨水相配合时，叶子生长加快，叶片薄而表面积大，接受的辐射量多，有利于光能利用率的提高。相反，在干燥而辐射强度大的条件下的小麦植株叶片厚且小，接受太阳辐射的面积大大减小。冬麦生长期间，长江流域的气候特点是辐射强度适中又有充沛的降水，而华北平原的气候条件是太阳辐射过强造成大量光饱和损失，还常伴有高温和大气干旱。这些都使北方冬麦的光能利用率的提高受到很大

的限制。北方冬麦营养体小(谷草比高)、越冬期间低温及光合作用中止造成的辐射能浪费等因素起了加剧南北方差异的作用。

小麦营养生长期的光饱和点较籽粒灌浆期低，又正值叶面积增长阶段，受气候条件的影响尤为显著，因而总干物质的光能利用率的南北差异大于籽实的光能利用率的南北方差异。

四、结　论

1.冬小麦群体光能利用率随生育期的变化曲线呈双峰型，抽穗期出现极小值。

2.施肥措施的产量效益是群体的能量转换效率、反射率和农田植被覆盖度三个因子对光能利用率综合影响的结果。营养生长期肥水过多对光能利用率的反馈导致施肥措施的经济效益下降。

3.在经济产量相同的前提下，南方冬麦群体的光能利用率大于北方的；营养生长期间光能利用率的南北方差异大于籽粒灌浆期的。

五、讨　论

1.我们用分析比较不同施肥措施下覆盖度、反射率和能量转换效率对光能利用率的影响的方法，较好地分析了施肥措施增产的机理。那么，其余栽培措施的增产机理是否也可以用类似的方法进行？笔者认为，如果能弄清营养生长期的光能利用率和籽粒灌浆期能量转换效率之间的定量关系、找出保持最高的籽粒灌浆期光能利用率的覆盖度、反射率、能量转换效率的最佳搭配及其与栽培措施的关系，将为定量分析栽培措施的增产机理提供方便。

2.小麦是我国主要的粮食作物。有关它的生产潜力、最高产量的研究对国民经济计划有很大的意义。目前这方面的研究大多数是以最合理的农业措施提供最适水肥条件为前提进行估算的。估算时以最大光能利用率作为整个生育期的光能利用率。这种估算方法是否合理还值得商榷。如果营养生长期内肥水供应为最适，光能利用率达到最大，势必造成过茂的植物群体，群体光合条件也必然严重恶化。这种群体的生育后期，栽培措施、水肥条件再适宜也难以取得最高能量转换效率。本试验中的II型群体，出苗—拔节期的E_u只有1.58%，后期就出现倒伏、E_c下降现象。如果前期E_u达到理想数值5—6%，那么，籽粒灌浆期的E_u大概连本试验中II型的水平都达不到了。为了使群体在籽粒形成至灌浆阶段有最高的光能利用率，必须控制营养生长期的光能利用率。所以，在估算最高可能产量时，营养生长期的光能利用率只宜取“最适光能利用率”。

本文是在南京农学院江广恒老师的指导下完成的，作者在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] 北京市农业科学院农业气象研究室光能利用研究组，北京郊区小麦光能利用率的初步探讨，植物学报，17(1)，pp.25—34，1975。

[2] 王亨等，冬小麦的农业气候分析，农业气候研究文集，中国科学院栾城自然资源考察队气候组，pp.45—64，1979。
[3] К. Я. 康德拉捷夫，太阳辐射能(中译本)，科学出版社，pp.463—464，1962。
[4] 殷宏章等，小麦群体结构与光能利用，农业学报，10(5)，pp.381—397，1959。
[5] 高清吉等，小麦光合作用和物质生产的研究，Ⅱ，小麦群体的光合能力和呼吸能力随生育期的变化，小麦生理，农业科学参考资料，pp.66—71，1978。
[6] 赖世登等，小麦光合速率和光呼吸的研究，植物学报，23(2)，pp.122—126，1981。
[7] Nichiprovich, A.A., 光合作用的遗传和选育高产作物的合理措施，光合作用与作物生产译丛，(1)，农业出版社，pp.16—31，1980。
[8] 郭绍峥等，千斤小麦光合产物的积累、分配和运转，江苏农业科学，pp.8—13，1981(1)。
[9] Evans, L. T., In Plant Response to Climatic Factor, Proceeding of the Uppsala Symposium (ed. by Slatyer, R. O.), UNESCO Paris, pp.21—35, 1973.
[10] Monteith, J. L., Vegetation and the Atmosphere, ACADEMIC PRESS INC (LONDON), Vol. 11, pp.2—3, 1975.
[11] Русин, Ц. П., Радиационный Баланс Поля, Засеянного Зерновыми Культурами, Труды ГГО, Выпуск 77, Гидрометеоиздат, pp.43—56, 1958.

A STUDY ON SOLAR ENERGY UTILIZATION BY WINTER WHEAT CROPS

Tan Hongbao

ABSTRACT

Through a combined approach of growth analysis and field microclimate observations, the variation of the utilization coefficient and transfer efficiency of solar energy and the relationship between them for various growth periods of two types of wheat crops are studied. An example of quantitative analysis, using the utilization coefficient of solar energy, of yield effect of cultivation practice is stated and an improvement on the current calculation of solar energy utilization by wheat crops is presented. The experiment shows that the curve of variation of the utilization coefficient with respect to growing stage exhibits a double-hump distribution with a minimum occurring in the heading stage. For the same economical yield, the utilization coefficient of solar energy is larger in South China than in North China. The benefit of using fertilizer is the net result of the combined effect of the transfer efficiency of solar energy, reflectance and vegetative cover on the utilization coefficient of solar energy.