

青藏高原冬小麦冠层几何结构、光截获
及其对光合潜能的影响*

382-388

S8-211/

林忠辉 周允华

(中国科学院地理研究所 农业生态与环境技术试验站 北京 100101)

王辉民¹ 张谊光

(中国科学院自然资源综合考察委员会 北京 100101)

摘要 在西藏拉萨测量了藏冬系列3个冬小麦品种的冠层几何结构及冠层对光合有效辐射(PAR)的反射率、透过率和截获率。通过实测和理论计算,结果表明:高原地区冬小麦叶片比平原地区的更趋于直立,具有比平原地区低的消光系数,能够容纳较大的绿叶面积和有效穗数;当冠层对PAR的截获率趋于饱和时,高原地区麦田可容纳的最大绿叶面积可达8.6,是平原地区的1.4倍左右;开花到成熟期间的叶日积(LAD)大约可达平原地区的2倍,绿叶面积持续时间长;整个生长季期间,高原地区的PAR总量是平原地区的1.7倍,单位绿叶面积所截获的PAR是平原地区的1.3倍,又由于其叶片的趋于直立,故从上到下叶片受光比平原地区更均匀和充分,群体光合潜力高,对PAR的利用率更高。这些因素是高原冬小麦高产的重要原因。

关键词: 青藏高原,冬小麦,冠层几何结构,光截获,消光系数,叶日积。

CANOPY GEOMETRICAL STRUCTURE, INTERCEPTION OF
PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION AND THEIR
EFFECTS ON POTENTIAL PRODUCTIVITY OF WINTER
WHEAT IN TIBET PLATEAU

Lin Zhonghui Zhou Yunhua

(Station for Agro-ecology and Environmental Technology, Institute of Geography,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China)

Wang Huimin Zhang Yiguang

(Commission for Integrated Survey of Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China)

Abstract Three winter wheat varieties were planted in Tibet Plateau. The geometry of canopy and interception of photosynthetically active radiation (PAR) were measured. Effects of those factors on grain yield were discussed. The results, from a theoretical analysis and field measurements, indicate that, in Tibet Plateau, leaves of winter wheat were erect while those in plain regions not so. From flowering to harvest time, the leaf area duration

* 国家自然科学基金资助项目。

致谢:承蒙项月琴研究员提供部分资料,特此致谢。

收稿日期:1996-07-20,修改稿收到日期:1997-03-05。

(*LAD*) of Plateau field was about 2 times of that of plain field. In growing season, when the interception of *PAR* tended to saturation, the maximum green leaf area which field could accommodate was about 8, 6, 1.4 times of that in plain regions. During growing period, the amount of *PAR* captured by unit green leaf area was 1.3 times of that in plain regions. *PAR* distributed vertically in the canopy was more even and sufficient than that in plain regions.

Key words. Tibet Plateau, winter wheat, geometry of canopy, interception of *PAR* extinction coefficient (*K*), leaf area duration (*LAD*).

青藏高原是小麦高产记录保持区,柴达木盆地(海拔2800m)曾创15.2t/hm²的春小麦单产世界记录。1991年,西藏乃东县(海拔3560m)曾创万亩冬小麦7.97t/hm²的大面积高产记录^[1],1995年,西藏达孜中国科学院拉萨农业生态试验站农场,在生产条件和技术水平都不很高的情况下,冬小麦产量也达到9.2t/hm²的水平。这一切都说明高原地区确实存在着有利于麦类作物高产的独特因素。

60年代以来,人们不断对高原麦类高产问题进行研究^[2~5],但这类研究多是以分析现象和气候特点为主,而对过程与内在联系研究不够,本文从冬小麦冠层几何结构着眼,从冬小麦群体的光截获入手,定量地研究了高原冬小麦的光能利用和产量问题。

1 材料与方法

试验于1994~1995年冬小麦生长季里在西藏达孜中国科学院拉萨农业生态试验站(29°41'N, 91°20'E, 海拔3668m)内进行,土壤为轻度沙壤土,土层较薄(40~80cm),多砂石。供试品种为藏冬系列的3个冬小麦品种:92-66, 85285-289, 90-11(*Triticum aestivum* L.)。1994年9月19日播种,南北行向,行距15cm,播种量分别为:255kg/hm²、285kg/hm²、225kg/hm², 1995-08-10收获,生长期326d,生长期间水肥供应充足,常规田间管理。

观测仪器有美国LI-COR公司的LI-190型点状量子传感器2台(置于2.5m高度处分别用以测定从小麦冠层顶部入射的和冠层反射的*PAR*量子值),LI-190型线状量子传感器2支(东西向置于小麦群丛底部用以测量透射到群丛底部地面的*PAR*量子值)。数据记录部分采用澳大利亚产自动数据采集器DT600。观测过程前后都对传感器进行了标定和平行比较,并对数据采集进行了检定。

数据采集方式 每15s扫描1次,测定各观测量之瞬时值,第30min输出观测值的平均值。故本文中有相关时刻的观测值实际是该时刻前30min内的平均值,观测是在3个品种间交替进行的,自1995-04-26开始(拔节期),8月5日(收割前5d)结束,每个品种连续观测3d,抽穗后,改为5d。

叶面积指数(*LAI*) 自拔节期起,每个品种每隔9d,从大田中取有代表性的两个50cm样段的小麦植株,分别从中选取有代表性的10株,用米格纸法求得其面积,抽穗后,改为每个品种15d一次。

叶日积(*LAD*) 叶日积^[6]定义为一定生育期内叶面积对生育时间的积分。它反应的是光合面积的大小和持续时间的长短,根据公式^[7]计算:

$$LAD = \sum \frac{1}{2} (L_{n+1} + L_n) (t_{n+1} - t_n) \quad (1)$$

式中 L_n, L_{n+1} 是指在 t_n, t_{n+1} 时的叶面积指数。

叶片倾角(θ_L) 叶片倾角定义为叶片法线方向与水平面的夹角,茎和穗的倾角定义为茎穗延长线方向与水平面的夹角。条播小麦群体在各生育期叶方位角分布趋势基本一致,略有小差异,但大体属均匀分布^[8,9],故而未测叶方位角,只在拔节期末~孕穗期测定了叶片倾角,在灌浆中期测定了叶、茎、穗倾角,每个品种测50茎。测量工具为悬一小锤的量角器,对于弯曲度大的叶片,分成2~3部分进行测量,每一测量单元称为1个叶面元。灌浆期还测定了分层叶面积。

2 结果与分析

2.1 冬小麦冠层几何结构

2.1.1 叶面积指数(LAI) 3个品种的群体叶面积指数变化趋势均表现为偏态抛物线状(图1)。92-66由于返青期灌水次数过多和施肥量稍大,形成大量无效分蘖,叶面积指数在拔节期即达到最大,但随着无效分蘖很快大量死亡而迅速下降。正常管理的90-11群体叶面积指数最大值出现在孕穗期末,抽穗以后逐渐下降。而品种85285-289虽然播种密度大,但由于播种地块土层太薄,砂石过多,保水保肥性能差,前期受旱较重,植株生长发育不正常,所以其叶片窄而短,叶面积指数在拔节期末才达到最大值(3.7),下降幅度比较平缓。与平原地区相比,高原上冬小麦叶片持绿时间长。高原地区冬小麦从拔节到抽穗需要50d左右,而在平原地区则约为30d^[9-11],开花前营养生长的时间比平原地区充分。高原冬小麦从拔节至成熟的时间可达110d以上,灌浆时间长达60d左右,而在平原地区这两段时间分别仅为50~80d和30d左右^[9-11]。开花后,平原地区的冬小麦 LAI 由于气温迅速回升而下降很快,而高原麦区最热月气温在16~18℃,绿叶面积下降相比之下要平缓得多。

在灌浆中期还测定了叶面积垂直分布,结果表明3个品种各层叶面积分布虽有差异,但都表现为中上部分布比例占较大比重。

2.1.2 叶片倾角(θ_L)和茎穗倾角 将叶、茎、穗倾角在 $[0^\circ \sim 90^\circ]$ 按每档 10° 分成9档,以叶面元的面积为权重,得到不同档次叶倾角下相对叶面积分布函数 $g(\theta_L)$:

$$g(\theta_L) = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (2)$$

θ_i 为叶面元的倾角, L_i 为叶面元的面积, m 为某一档次叶倾角下的叶面元数, n 为叶面元总数, $g(\theta_L)$ 随品种、地域、生育期不同表现出明显差异(图2)。

对于品种90-11而言,孕穗期叶倾角集中在 $[70^\circ \sim 90^\circ]$,其叶片直立性很好,而到灌浆期叶倾角趋向于均匀分布,最大值出现于 $[60^\circ \sim 80^\circ]$,近直立性叶片大量减少,孕穗期平均叶倾角为 74° ,灌浆期为 53° 。

对于品种85285-289而言,孕穗期平均叶倾角集中在 $[80^\circ \sim 90^\circ]$,而到灌浆期叶倾角最大值出现于 $[70^\circ \sim 80^\circ]$,叶倾角分布主要集中于 $[70^\circ \sim 90^\circ]$,孕穗期平均叶倾角为 78° ,灌浆期为 70° 。

品种92-66和前两个品种比较而言,在两个生育期其叶倾角分布都较为均匀,孕穗期叶倾角分布主要集中在 $[50^\circ \sim 90^\circ]$,而到灌浆期则显得更趋均匀,分布范围主要在 $[40^\circ \sim 90^\circ]$,孕穗期叶倾角平均为 66° ,灌浆期为 56° 。

3个品种的茎穗倾角主要集中在 $[80^\circ \sim 90^\circ]$,基本趋于直立。

与平原地区的观测结果比较(图2),可以看出,生育前期(分蘖~抽穗)高原地区的冬小麦叶倾角分布范围要比平原的集中得多,其叶片直立性比平原的要好,随着生育期的推进,无论高原和平原地区叶片倾角都随着叶片逐渐老化而减小,叶片有倾向于水平的趋势。生育前期叶片越直立,冠层上下叶片受光就越均匀和充分,也有利于分蘖成穗和有效穗数的增加,而单位土地面积所能容纳的有效穗数的高低是决定高产的重要因素之一。

2.2 叶日积(LAD)

3个冬小麦品种籽粒产量92-66为 $8.7\text{t}/\text{hm}^2$,90-11为 $9.2\text{t}/\text{hm}^2$,85285-289为 $7.1\text{t}/\text{hm}^2$ 。从拔节到收获的LAD相应分别为436.7、342.8、231.2,而在平原地区,高产麦田的LAD为270~296,传统栽培麦田在220~290之间^[9,11]。正常栽培条件下,此一阶段高原地区麦田的LAD是平原地区高产麦田的1.2倍以上。开花

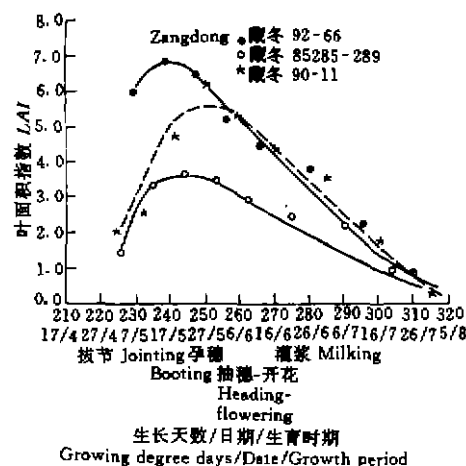


图1 青藏高原3个品种的冬小麦群体叶面积指数动态变化

Fig. 1 Dynamical change of leaf area index (LAI) of three winter wheat varieties in Tibet Plateau

~成熟的 LAD 值 92-66 为 174.6, 90-11 为 170.5, 85285-289 较低, 为 116.1; 在平原地区, 北京地区产量在 $5.25\text{t}/\text{hm}^2$ 以上的 3 个品种 LAD 平均仅为 94.7^[10], 高原冬麦田的 LAD 高达平原的 1.8 倍。研究表明, 从开花到成熟阶段叶日积的大小是决定籽粒产量高低的一个重要因素, LAD 与籽粒产量有明显的线性相关^[7,8,10,12]。高原地区的 3 个品种拔节~开花和开花~成熟的 LAD 都要比平原麦田高, 表明高原地区冬小麦田光合面积较大, 持绿时间也比平原地区长, 这是导致高原地区的冬小麦比平原地区高产的重要因素。

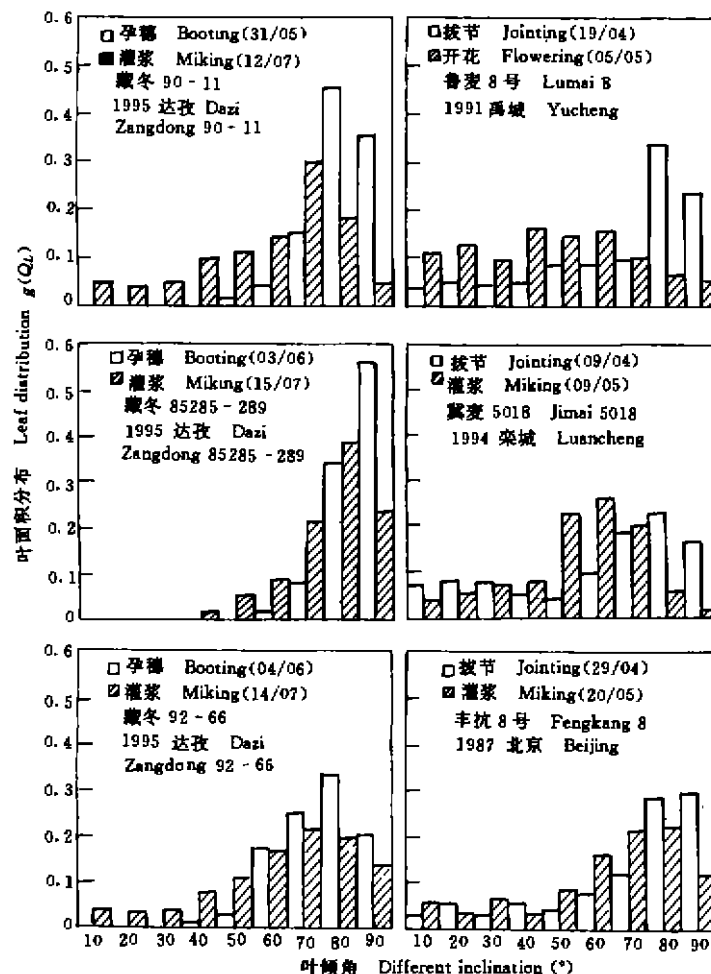


图2 不同地区冬小麦主要生育阶段不同倾角下相对叶面积分布(以禹城, 茌城, 北京地区的观测结果代表平原地区)

Fig. 2 Leaf distribution $g(\theta_L)$ at different inclination at growing stages of winter wheat in different regions (plain regions, Yucheng, Luancheng and Beijing)

2.3 冠层 PAR 透过率日变化

冠层对 PAR 的透过率, 反射率和截获率的日变化由冠层本身的几何结构、叶片光学特性、太阳高度角和天气条件等决定。晴天条件下, 冠层对 PAR 的反射率变化幅度较小, 且与 LAI 和品种关系不大。而透过率和截获率则明显与 LAI 和太阳高度角的大小有关, 日变化过程表现很明显: 中午前后, 透过率增高很快, 截获率下降较大, LAI 越小, 变化幅度越大。

为了研究晴天条件下透过率日变化特性和群体结构之间的关系, 对透过率日变化作了理论计算。取叶片呈均匀分布($\theta_L = 0^\circ$)和垂直分布($\theta_L = 90^\circ$)两种情况。计算时, 叶片作黑色处理, 不考虑叶片本身的透光和反射。这样, 透过率 τ_P 满足方程:

$$\tau_p = (\tau_D + \tau_S \frac{S'}{D}) / (1 + \frac{S'}{D}) \quad (3)$$

式中 τ_D 和 τ_S 分别为冠层对 PAR 散射辐射和直接辐射的透过率, S' 和 D 为到达冠层顶部水平面上的 PAR 散射辐射和直接辐射, 其中, τ_S 满足方程:

$$T_S = e^{-K_S L} \quad (4)$$

$$K_S = \begin{cases} 2\cot\alpha/\pi & \text{当 } \theta_L = 90^\circ \text{ 时} \\ 1/\sin\alpha & \text{当 } \theta_L = 0^\circ \text{ 时} \end{cases} \quad (5)$$

K_S 为冠层对 PAR 直接辐射的消光系数, α 为太阳高度角, τ_D 值取自 Ross 的著作^[13]。

图3是 τ_p 实测值和理论计算结果的比较。可以看出, 青藏高原的这几个品种的冬小麦冠层在晴天条件下透过率的日变化形势大致介于直立型和均匀型黑色叶片的理论计算结果之间, 而以90-11和85285-289更趋向于直立型。

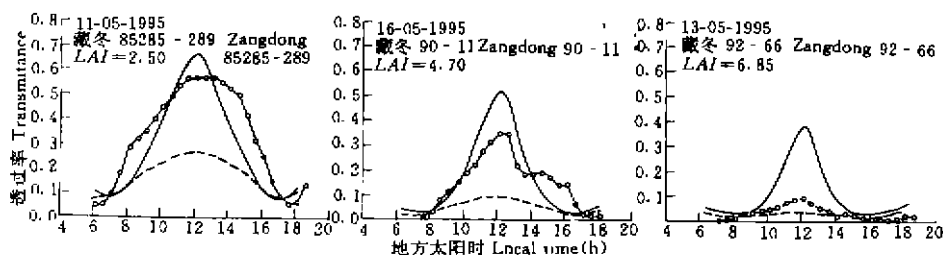


图3 拔节期晴天条件下冬小麦冠层对 PAR 的透过率的日变化

(——为直立叶片模式, ---为均匀叶片模式, —○—为实测值)

Fig. 3 Changes of transmittance of PAR in winter wheat canopy at jointing stage on a clear day

(——, model of vertical leaves; ---, model of uniform leaves; —○—, measured data)

阴天条件下, 由于太阳高度角的影响不明显, 因此冠层 PAR 的反射率、透过率的日变化不明显。

2.4 冠层对 PAR 传输的逐日变化

通过对 PAR 入射、透过和反射日总量的计算, 获得了群体的日平均透过率、反射率和截获率的动态变化曲线(图略)。3个品种冠层顶部对 PAR 日平均反射率变化幅度在0.02~0.12, 其日平均反射率维持在0.02~0.04之间的时间大约为80d, 变化幅度不大, 在收获前10d左右, 冠层日平均反射率上升较快, 日平均透过率则随着叶面积增大而逐渐降低, 在开花~灌浆初期达到最小, 最小值92-66和90-11均为0.03, 85285-289为0.20。开花~灌浆期, 截获率达到最高, 品种92-66和90-11为0.95, 85285-289为0.80。在灌浆后期, LAI下降, 透过率逐渐上升, 截获率下降。平原地区品种的变化趋势^[10]与高原品种的大致一致。整个生育期维持 PAR 平均截获率在0.90以上的天数92-66为40d, 90-11为50d, 平原地区品种则为30d左右^[10]。较长时间对 PAR 的高截获率以及相对较高的叶日积成为高原地区小麦高产的一个重要因素。

2.5 消光系数的日变化

消光系数反映的是冠层几何结构的特性, 冠层对 PAR 的透过率 τ_p 可写成^[14],

$$\tau_p = e^{-KL} \quad (6)$$

所以有:

$$K = -\ln\tau_p/L \quad (7)$$

K 是消光系数, L 是叶面积指数。根据日平均透过率 τ_p 计算了高原冬小麦的 K 值, 同时也对模式叶片(直立型和均匀型)的 K 值作了计算(计算时考虑到茎秆和穗的消光作用, 所以 LAI 包括叶面积、茎、穗纵切面积)。结果列于表1。

表1 青藏高原冬小麦冠层消光系数随生育期的变化

Table 1 Changes in intenuation coefficient(K) at different growing stage

	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	平均 Average	抽穗期 Heading	灌浆前期 Early filling	灌浆中期 Middle filling	灌浆后期 Late filling	总平均 Whole average
藏冬90-11 ^①	0.473	0.339	0.406	0.388	0.478	0.496	0.504	0.446
藏冬92-66 ^②	0.444	0.550	0.497	0.628	0.621	0.538	0.646	0.571
藏冬85285-289 ^③	0.345	0.320	0.333	0.266	0.339	0.309	0.483	0.343
直立型 Vertical	0.463	0.385	0.424	0.382	0.390	0.413	0.462	0.416
均匀型 Uniform	0.639	0.574	0.607	0.584	0.584	0.621	0.689	0.615

①Zangdong90-11, ②Zangdong92-66, ③Zangdong85285-289

就整个生育期而言,典型栽培条件下(以90-11为例),青藏高原冬小麦冠层对 PAR 的消光系数基本介于直立型与均匀型之间;生育前期(拔节~孕穗),叶片更趋向于直立,具有较小的消光系数;抽穗后,由于叶片充分展开和穗部、枯黄叶片的消光效果, K 值变大,与平原地区的结果相比较,返青到开花,北京地区9个品种的 K 值平均为0.534,开花期为0.739^[10],美国 Kansas 的两个品种的 K 值平均为0.91^[11],可以看出高原小麦冠层尤其是生育前期具有较低的消光系数。

2.6 日平均截获率和叶面积指数的关系

冠层对 PAR 日平均截获率与叶面积指数的关系见图4(由于品种85285-289植株前期受旱较重,生长发育不能代表正常情况,故未列入图中)。随着生育期的推进,日平均截获率与叶面积指数的关系变化可分为两个阶段:(1)生长阶段(返青~抽穗),(2)衰老阶段(灌浆期和乳熟)。生长阶段,叶面积很快上升, PAR 截获率也随之很快上升;当叶片到了衰老阶段,在相同的叶面积指数下具有更高的截获率,其原因除了在此阶段叶片充分展开,叶倾角减小外,茎、穗和枯黄叶的截获也是重要原因。当叶片完全衰老枯黄时, PAR 截获率的大小完全依赖于茎、穗纵切面积的大小,测量表明,茎、穗和枯黄叶片对 PAR 截获率约在0.7~0.8之间。

与平原地区的观测结果比较(图4),发现在生长阶段,相同的叶面积指数下,高原小麦冠层的 PAR 截获率明显低于平原品种的相应值约14.0%。当冠层对 PAR 的截获率趋于稳定时(即透过率达到最低时),按式(7)计算,高原地区冬小麦的 LAI 可达8.6($\tau_p=0.03, K=0.406$),平原品种的则为6.1($\tau_p=0.03, K=0.571$)。平原地区的研究结果为 LAI 在5.0~6.0^[11,15~17],即高原麦田最大叶面积容纳量可达平原麦田的1.4倍。显然,这是因为高原冬小麦株型更趋于直立的缘故。到了衰老阶段,高原和平原地区的冬小麦叶片都趋于平展,在此阶段, PAR 截获率表现出相近的衰变趋势。

3 讨论

青藏高原的冬小麦高产具有多方面的原因,就本研究而言,有以下几个重要因素:

①整个冬小麦生长季期间,到达冠层顶部的 PAR 总量,高原大致是同纬度的平原地区的1.7倍左右^[18],高原冬小麦生长具有较好的光照条件。

②在强辐射的环境条件下,高原地区的冬小麦表现出较强的生态适应性,具有比平原地区更为直立的株型结构。尤其是生育前期冠层对 PAR 较低的消光系数使得冠层中下部叶片也能有较好的光照,不至于发生早衰。相对于平原地区,高原小麦可以承受较大的种植密度,麦田可容纳更高的绿叶面积和有效穗数。生长期间,冠层对 PAR 的截获率趋于稳定时,高原地区麦田可容纳的最大绿叶面积是平原地区的1.4倍左右。以此为参考,高原冬小麦单位绿叶面积所截获的 PAR 是平原地区的1.3倍。较大的绿叶面积指数和单位绿叶面积截获较高的 PAR 能量使得高原地区冬小麦整个群体的光合潜能要比平原地区的强得多。

③高原地区的冬小麦生育期长,灌浆时间可达60d以上,是平原地区的2倍左右,高原冬小麦开花至成熟的 LAD 是平原品种相应值的1.8倍左右。按冠层 PAR 截获达到稳定时高原和平原地区麦田可容纳的最

大叶面积指数计算,从开花到成熟,高原冬小麦的LAD可达平原品种的2.1倍。而研究表明,此一阶段LAD的大小是决定小麦籽粒产量高低的一个重要因素,LAD与籽粒产量有明显的线性相关^[7,8,10,12]。因此高原冬小麦的产量高达平原地区的2倍就不难理解了。

总之,青藏高原冬小麦由于具有较为直立的株型结构和较低的消光系数,可以承受较大的种植密度,麦田可容纳较高的绿叶面积,截获较多的PAR能量,加之生育期内叶日积高是其光合潜能高的重要原因。

如果能够进一步对高原冬小麦各主栽品种的株型结构和光能截获进行观测,并与内地品种进行比较,能够确定高原冬小麦具有比内地品种更为直立的株型结构和较低的消光系数是其高产的重要基础,则无论对高原还是平原地区的冬小麦生产都将具有重要的指导意义。从育种的角度可以考虑培育株型更趋于直立的品种,从而生产上可以加大种植密度,提高单位面积上容纳的绿叶面积和有效穗数,进而提高冬小麦的产量水平。平原地区的冬小麦生产从中也可得到借鉴。

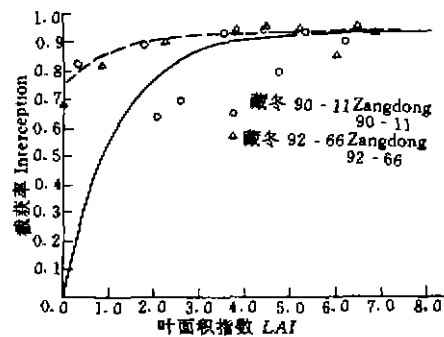


图4 冬小麦冠层对PAR的日平均截获率与叶面积指数的关系

(实线和虚线分别代表平原冬小麦生长阶段和衰老阶段的观测结果^[16],实线以下的点和虚线附近的点分别代表高原冬小麦生长阶段和衰老阶段的观测结果)

Fig. 4 Relation between mean daily interception of PAR and leaf area index (LAI) of winter wheat

(lines on behalf of the results in plain regions for the growth (solid) and senescent (dashed) periods^[16], points below the solid and nearby the dashed lines on behalf of the results in plateau region for the growth and senescent periods separately)

参考文献

- 1 张道光. 青藏高原农业气候资源的特点与功能. 中国青藏高原研究会第一届学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1992. 134~140
- 2 李继由. 试论青藏高原麦类作物高产的农业气候原因. 自然资源, 1983, 2: 80~85
- 3 刘伟. 西藏麦类作物的光合作用及其物质生产的特点. 自然资源, 1983, 4: 51~55
- 4 汪绍铭. 青藏高原柴达木盆地气候生态资源特点和农业开发. 生态学杂志, 1990, 9(3): 65~68
- 5 刘东海. 冬小麦在我区粮食生产中的地位. 西藏科技情报, 1991, (1): 22~23
- 6 Watson D J, Thorne G N and French S A W. Analysis of growth and yield of winter and spring wheats. *Ann. Bot. N. S.*, 1963, 27: 1~22
- 7 Welbank P J, French S A and witts K J. Dependence of Yields of Wheat Varieties on Their Leaf Area Durations. *Ann. Bot.*, N. S. 1966, 30: 291~299
- 8 董振国, 刘瑞文. 黄淮海平原高产田作物群体结构特征. 应用生态学报, 1992, 3(3): 240~246
- 9 顾景义, 郑有飞等. 小麦群体结构及光能利用. 中国农业气象, 1995, 16(6): 5~9, 34
- 10 曹浙荣, 赵双宁, 李青. 北京地区高产小麦品种的冠层形成、光截获和产量. 作物学报, 1991, 17(3): 161~170
- 11 董振国, 于沪宁. 农田作物层环境生态. 北京: 中国农业科技出版社, 1994. 2~75
- 12 Evans L T. *Crop Physiology*. Cambridge University Press, 1975, 101~149
- 13 Rosa J. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. W Junk (Publisher), The Hague, 1981, 90~245
- 14 Monsi M and Saeki T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jpn. J. Bot.* 1953, 14: 22~52
- 15 Hipps L E, Asrar G, and Kanemausu E T. Assessing the Interception of Photosynthetically Active Radiation in Winter wheat. *Agrie. Meteorol.* 1983, 28: 253~259
- 16 Asrar G, Fuchs M, Kanemausu E T, et al. Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 1984, 76: 300~306
- 17 董树亭. 高产冬小麦群体光合能力与产量关系的研究. 作物学报, 1991, 17(6): 462~469
- 18 左大康, 周允华, 项月琴等. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991. 86