

土壤水分对冬小麦生长后期光能利用及水分利用效率的影响

房全孝^{1,2} 陈雨海^{2,*} 李全起² 于舜章² 罗毅¹ 于强¹ 欧阳竹¹

(¹ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ² 山东农业大学, 山东泰安 271018)

摘要: 通过控制不同土壤水分条件形成不同的小麦 (*Triticum aestivum* L.) 群体结构, 测定了抽穗到成熟期间小麦冠层光合有效辐射 (PAR) 截获及垂直分布、干物质积累和产量。研究表明, 不同处理小麦冠层对 PAR 的截获量差异较小 (小于 15.7%), 但冠层上部 (60~80 cm) 的 PAR 截获量和生长后期 PAR 转化效率差异明显 (100.7% 和 63.7%), 与产量和光能利用效率变化一致, 可见土壤水分是通过改变小麦群体内 PAR 垂直分布及 PAR 转化效率对作物产量和光能利用效率产生影响。抽穗到成熟期间维持小麦冠层上部 PAR 截获率在 50% 左右是实现高产的重要保证。随着土壤水分改善, 冬小麦光能利用率和产量持续增加, 但水分利用效率却先于二者提前降低, 说明改善水分利用效率是提高华北地区农业气候资源利用效率的关键。在底墒充足的条件下, 分别在拔节和挑旗期灌水 60 mm 可获得较高的光能和水分的利用效率及经济产量。

关键词: 土壤水分; 冬小麦; 冠层结构; 光能和水分的利用效率

中图分类号: S512

Effects of Soil Moisture on Radiation Utilization during Late Growth Stages and Water Use Efficiency of Winter Wheat

FANG Quan-Xiao^{1,2}, CHEN Yu-Hai^{2,*}, LI Quan-Qi², YU Shun-Zhang², LUO Yi¹, YU Qiang¹ and OU-YANG Zhu¹

(¹ Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; ² Agronomy College, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China)

Abstract: Water stress is a frequent and critical limit to wheat (*Triticum aestivum* L.) production in the North China Plain. It has been shown that photosynthetic active radiation (PAR) has close relation to crop production, and water stress affects the biosynthetic procedure remarkably. However, its mechanism is still not clear. An experiment was conducted at Yucheng ecological station in Shandong Province to investigate the interception and conversion efficiencies of PAR in the canopy from heading to maturity stages, and water use efficiency (WUE) of winter wheat at different soil moisture levels. The relationship between soil moisture level and PAR vertical distribution in wheat canopy, and its influences on grain yield, PAR use efficiency and WUE were evaluated. Different supplemental irrigation amounts from 0 to 180 mm and timings from jointing to grain filling stages were designed to attain various soil moisture levels, which resulted in different wheat populations and canopy structures. These soil moisture levels showed substantial influences on PAR interception and distributions in canopy from heading to maturity stages, and subsequent PAR and water use efficiencies. No great difference (less than 15.7%) in PAR intercepted by the wheat canopies was found between these soil moisture treatments during this period. While great differences in PAR intercepted by the top layer of the canopy (60~80 cm) (100.7%) and in PAR conversion efficiency (63.7%) were found between these treatments (Table 4 and Fig. 4). This result was mainly caused by the changes in the vertical distributions of leaf area index (Fig. 3) and in leaf photosynthesis capability caused by the different soil moisture levels. Maintaining about 50% PAR rate intercepted by the top canopy layer (60~80 cm) from heading to grain filling stages is very important for obtaining high grain yield and PAR use efficiency for winter wheat. With soil moisture improving, the PAR use efficiency during the late growth stages and grain yield were increased, but WUE decreased prior to the grain yield and PAR use efficiency (Fig. 5), which indicated that improving WUE was essential to increasing other natural resources use efficiency in wheat growing season in the North China Plain. In current conditions with well initial soil moisture, two supplemental irrigations with 60 mm at jointing and booting stages could obtain high grain yield and WUE, and additional supplemental irrigations would not increase grain yield greatly but decrease WUE of winter wheat.

基金项目: 中国科学院禹城实验站开放课题基金项目 (YC2002006) 及“聊城市国家计委大型优质小麦生产基地项目” (20021106)。

作者简介: 房全孝 (1976-), 男, 中国科学院地理所在读博士生。E-mail: fangqx@igsrr.ac.cn

*通讯作者 (Corresponding author): 陈雨海。

Received (收稿日期): 2005-05-26; Accepted (接受日期): 2005-12-15.

Key words: Soil moisture; Winter wheat; Canopy structure; PAR and water use efficiency

表1 试验灌溉处理

Table 1 Irrigation treatments of the experiment (mm)					
处理 Treatment (day/month)	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	
拔节期 Jointing stage (26/3)		60	60	60	
挑旗期 Flag stage (12/4)			60	60	
灌浆期 Filling stage (9/5)				60	
总灌溉量 Total amount of irrigation	0	60	120	180	

注:各生育期后括号内的数字表示灌水日期。

Note: Numbers in brackets denote the date of irrigation application.

表2 冬小麦生育期内降雨量及分布

Table 2 Rainfall distribution and amount during the winter wheat growing season

日期 Date (year/month)	降雨量 Rainfall (mm)	日期 Date (year/month)	降雨量 Rainfall (mm)
2001/10	28.8	2002/03	5.1
2001/11	4.2	2002/04	32.7
2001/12	1.7	2002/05	55.8
2002/01	2.9	总量 Total amount	131.2
2002/02	0		

水资源短缺且分配不均华北地区农业持续发展的重要限制因子^[1],以提高农业用水效率为目标的节水农业是华北地区农业生产持续发展的重要途径。该地区水资源不足而热量资源相对丰富导致冬小麦生育期内水分胁迫时常发生,限制了作物光合生产潜力的发挥。研究不同土壤水分条件下冬小麦光能和水利用及产量变化规律对提高作物对光、温、水等农业气候资源的利用效率,实现作物高产稳产有重要的实践意义。而关于作物光能和水利用效率的研究多以不同播量或种植方式(间套种)形成不同群体结构,对作物冠层光能截获、分布以及生长后期光合产物转化和运输分配等进行研究,结果表明作物产量形成与后期光能利用关系极为密切^[2-6]。土壤水分胁迫对以上生理生态过程具有显著的影响^[7-8],但是关于这方面较系统的研究还较少。本试验在严格控制不同的土壤水分条件下,对不同小麦群体从抽穗到成熟期群体光合有效辐射(PAR)截获、垂直分布、利用及光合产物运输分配特征与产量形成和水分利用的关系进行分析,旨在进一步明确土壤水分胁迫影响作物光能和水利用及产量形成的机制,为冬小麦节水灌溉、高效生产提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于2001—2002年在中国科学院禹城综合生态试验站进行,土壤为中壤土,耕作层含有机质1.4%、全氮0.08%、全磷(P₂O₅)0.30%、全钾(K₂O)2.08%。生育期内施N素(尿素)300 kg·hm⁻²,底肥和拔节追肥各50%,P₂O₅(过磷酸钙)300 kg·hm⁻²、K₂O(硫酸钾)75 kg·hm⁻²作为底肥一次施入。试验品种为93-52,播量200株/m²,行距25 cm。通过水泥池(正方形)和遮雨棚控制灌溉水和降雨,面积为6.67 m²,池壁深1.5 m,每池中心位置装有1.5~2.0 m深的中子管,以备测定土壤水分。

试验设4个灌溉处理(表1),T₁和T₂为遮雨条件,T₃和T₄为不遮雨条件,3次重复。各处理在播前都灌底墒水100 mm,以确保冬小麦生育前期水分充足。冬小麦生育期内降雨量仅为131.2 mm(表2),为干旱年份。

1.2 项目测定和计算

1.2.1 土壤水分 用CNC503DR型智能中子水分仪测定,10 cm为1个土壤层次,5~7 d检测一次。

1.2.2 冠层光合有效辐射 用Sunflerk冠层分析仪(美国)在距地面0、20、40、60和80 cm(冠层顶部)处分别测定入射和反射的光合有效辐射(μmol·m⁻²·s⁻¹)。在抽穗到成熟期间选择典型的晴天和阴天进行,从7:00到18:00,每1或2 h测定一次。

1.2.3 冠层内不同层次 PAR 截获率(capture rate, CaR) $CaR_i = (IPAR_i - RPAR_{i-1}) / (IPAR_i - RPAR_i)$ ^[6],式中,IPAR_i和RPAR_i分别为冠层内某一层的入射量和反射量,i或i-1分别为冠层内不同的层次,即80、60、40、20和0 cm。当计算冠层总的截获率时,i和i-1取80 cm和0 cm。全天冠层 PAR 截获率即 PAR 日截获率用不同时刻(7:00~18:00)的 PAR 截获率的平均值表示。

1.2.4 抽穗到成熟期内冠层 PAR 日截获量 分抽穗到灌浆(4月22日至5月10日)和灌浆到成熟(5月10日至6月5日)2个阶段计算。用冠层 PAR 日截获率与 PAR 日入射总量(根据气象资料中太阳日辐射资料乘以0.5求得)相乘求得冠层 PAR 日截获量,以日为步长,计算冠层 PAR 总截获量。冠层内不同层次 PAR 日截获量的计算与上相似,不同的是用冠层不同层次的 PAR 日截获率代替冠层 PAR

日截获率。其中,从抽穗到灌浆小麦冠层 PAR 日截获率根据 4 月 22 日和 5 月 4 日 2 次测定平均求得,从灌浆到成熟期冠层 PAR 日截获率根据 5 月 4 日到 5 月 23 日 2 次测定平均求得。

1.2.5 光能(PAR)利用效率 PAR 利用效率 = PAR 截获率 $\times PAR$ 转化效率(某一生育阶段干物质积累量/同期内 PAR 截获量)^[9]

1.2.6 农田耗水量 土壤水量平衡方程(池栽条件下不考虑地表径流及地下水影响)为农田耗水量 = $\Delta S + I + P$ 。式中, P 为降水量,从气象数据获得; I 为灌溉量,由水表测定; ΔS 为土壤蓄存水变化量,用水层厚度 Δh (mm) 表示, $\Delta h = 10 \sum (\Delta \theta_i \times Z_i)$ 。 $\Delta \theta_i$ 为土壤某一层(i) 在给定时段内体积含水量变化, Z_i 为土壤 i 层次厚度(cm),土壤层次 i 是从土壤第 i 层到第 m 层。

1.2.7 水分利用效率 水分利用效率 = 籽粒产量/农田耗水量。冬小麦单茎数、叶面积指数、干物质积累只在 1 个重复中进行测定,从返青开始,2~3

周测定一次。与光合有效辐射测定相结合,在抽穗期和灌浆期测定冠层内不同层次叶面积分布。地上部生物量和产量在成熟期每个重复取 2 m² 植株进行测定,并计算收获指数。降雨、气温以及太阳日辐射量在附近的气象观测场测定。

2 结果与分析

2.1 冬小麦生育期内土壤水分动态

冬小麦生育期内各处理 0~100 cm 土壤含水量都呈明显下降趋势(图 1),从田间持水量的(83.1 ± 1.5)%(播种前)降低到(57.2 ± 4.7)%(成熟期)。拔节前(3 月 26 日),各处理土壤水分含量在田间持水量的 60%以上,差异不显著。拔节后到成熟(6 月 3 日),由于灌水和降雨不同,各处理土壤水分含量差异明显。其中 T_1 和 T_2 土壤水分降低到田间持水量的 60%以下,水分亏缺严重,而 T_3 和 T_4 土壤水分较高,水分亏缺较轻。

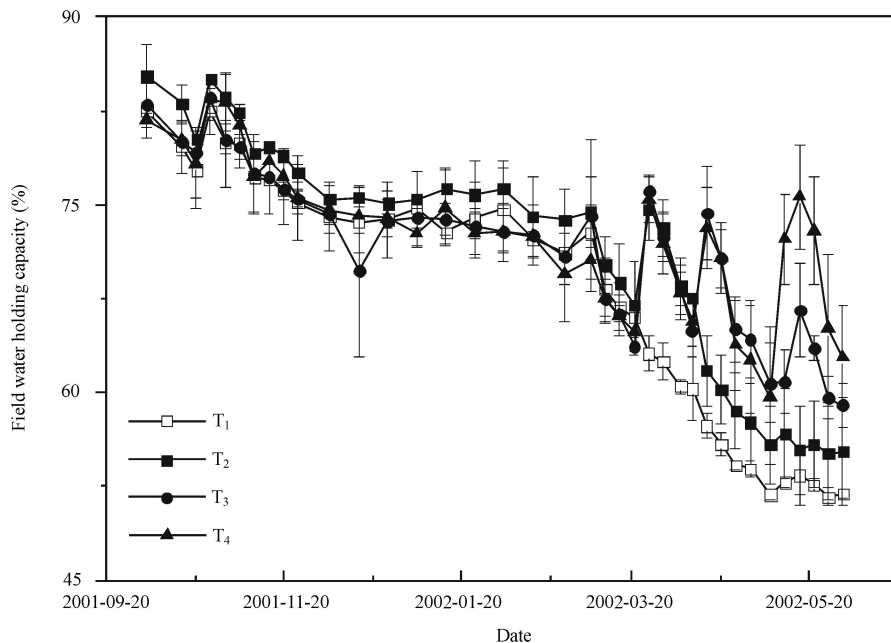


图 1 冬小麦生育期内不同处理 0~100 cm 土壤水分动态(2001—2002)

Fig. 1 Changes in soil moisture in 0 - 100 cm layer in the winter wheat season (2001~2002)

(Error bars indicate the standard error ,i. e. S. E.)

2.2 冬小麦叶面积指数及其垂直分布

从返青到拔节之前冬小麦 LAI 差异不明显(图 2-a),拔节后土壤水分亏缺降低了最大 LAI ,并使之提前达到最大值(T_1),因为拔节期干旱降低了单茎

叶面积,而茎数下降相对较快(图 2-b),而 T_3 和 T_4 在灌浆期维持较高的 LAI 是因为较高的单茎叶面积和单茎数。土壤水分显著改变了 LAI 在冠层内的垂直分布,抽穗到灌浆期间不同处理冠层内不同层次

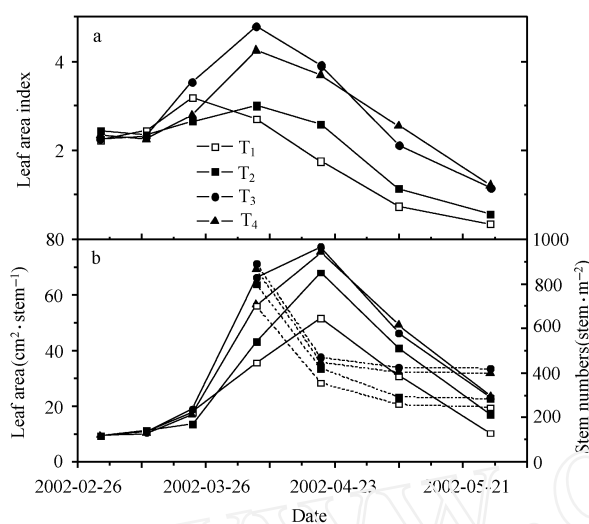


图2 不同处理叶面积指数(a)与单茎叶面积和单茎数变化(b)
Fig. 2 Leaf area index (a), stem number and leaf area per stem (b) in different treatments
实线为叶面积指数或单茎叶面积;虚线为单茎数。
Real lines denote LAI or leaf area per stem; broken lines denote stem numbers per m^2 .

LAI 分布差异极为明显(图3):土壤干旱(T_1 和 T_2)可显著降低冠层上层(60~80 cm)和下层(0~40 cm)的 LAI,而对冠层中部(40~60 cm) LAI 影响相对较小。 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 LAI 变异范围在冠层上层和下层分别为 0.59 ± 0.23 和 1.13 ± 0.43 ,而中层为 0.59 ± 0.13 。这主要是拔节期水分胁迫限制了冠层上部叶片增长(T_1),而抽穗后水分胁迫导致下部叶片早衰的结果(T_1 和 T_2)。冬小麦生长后期 LAI 动态及其在冠层内垂直分布的改变必然对冠层光能的截获及利用产生重要影响。

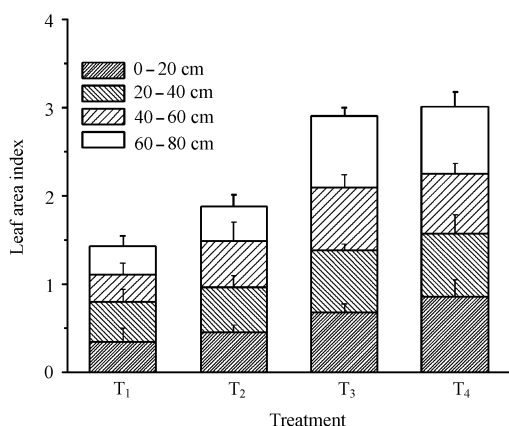


图3 不同处理抽穗后叶面积指数在冠层内的垂直分布(4月20日和5月7日测定平均值)
Fig. 3 Vertical distributions of LAI in canopy after heading stage in different treatments (Averaged measurements on 20 April and 7 May)
(Error bars indicate the standard error, i.e. SE.)

2.3 冬小麦生长后期冠层 PAR 截获变化

冬小麦抽穗后冠层 PAR 反射率在各处理间差异很小(数据没有列出),但 PAR 漏射率及截获率在不同处理及不同时期差异明显(表3)。随着土壤水分的改善,各处理冠层 PAR 漏射率表现为 $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$,而截获率表现为 $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$ 。从抽穗到灌浆后期(5月23日), T_1 和 T_4 冠层 PAR 漏射率分别增加 3.43% 和 13.9%,而截获率分别下降 3.7% 和 15.9%,可见水分胁迫显著降低小麦生长后期冠层 PAR 截获率,漏光损失是主要原因。从小麦开花期(5月4日)冠层 PAR 日截获量及其垂直分布看(表4),4个处理均呈增加趋势,增幅小于 15.7%,而冠层上层和下层呈相反趋势显著变化,分别增加或降低 1 倍左右,中层增加较小。冠层 PAR 漏射损失与冠层下层光能截获变化趋势一致,即冠层下部截获越多漏射损失越大。可见土壤水分条件不同改变了小麦 LAI 及其在冠层内的垂直分布,对生长后期冠层 PAR 日截获量影响相对较小($36.27 \sim 41.98 \text{ mol } m^{-2} d^{-1}$),而对其在冠层内垂直分布影响极为显著,灌水明显提高了冠层上层(穗、旗叶和倒二叶等功能器官)对 PAR 的截获(约占总截获量的 50%)及光合性能,这对于提高冬小麦生长后期光合产物供应及籽粒灌浆具有重要意义。

2.4 冬小麦生长后期干物质积累和光能转化率变化

由图4看出, T_1 到 T_4 从抽穗到成熟期小麦冠层 PAR 截获量、转化率及干物质积累呈相同的变化趋势。 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 冠层 PAR 截获总量分别为 1 064、1 134、1 207 和 1 224 $\text{mol } m^{-2}$,增加幅度为 15.0%,而干物质积累增加 88.2%,说明由于土壤水分的改善提高了小麦冠层 PAR 截获量,但并不是提高干物质积累的主要原因,而 PAR 转化率的提高(T_1 到 T_4 增加 63.7%,图4)是此期内干物质积累迅速增长的主要原因。从抽穗到成熟期小麦冠层上部 PAR 截获量由 285 $\text{mol } m^{-2}$ (T_1) 到 572 $\text{mol } m^{-2}$ (T_4),增加 1 倍,达到总截获量的 50%,籽粒数由 7 858 粒 m^{-2} (T_1) 增加到 21 392 粒 m^{-2} (T_4),而千粒重却没有下降(4个处理平均值为 $45.3 \text{ g} \pm 2.4 \text{ g}$),这与小麦后期干物质积累状况一致。可见冬小麦生长后期冠层上层 PAR 截获量的提高显著改善了作物光能转化利用效率和光合产物的供应能力。

表 3 冬小麦生长后期不同处理小麦冠层内 PAR 漏射率及截获率变化

Table 3 Changes in penetration loss and capture rate of PAR in wheat canopy under different treatments

处理 Treatment	漏射率 Penetration loss rate(%)			均值 Average(%)	截获率 Interception rate(%)			均值 Average(%)
	04 - 22	05 - 04	05 - 23		04 - 22	05 - 04	05 - 23	
T ₁	11.8	14.00	25.67	17.15 ± 7.5 a	84.7	82.4	70.6	79.2 ± 7.6 b
T ₂	8.29	11.14	17.91	12.45 ± 4.9 ab	88.5	85.9	78.5	84.3 ± 5.2 ab
T ₃	3.40	7.27	11.46	7.38 ± 7.4 b	93.7	90.0	85.6	89.8 ± 4.1 a
T ₄	4.55	6.57	7.98	6.37 ± 6.4 b	92.6	90.7	88.9	90.7 ± 1.9 a

注:表中数据是 2002 年 4 月 22 日、5 月 4 日和 5 月 23 日的测定结果(反射率数据没有列出),不同的小写字母表示在 0.05 水平有显著差异。
Notes: Data were measured on April 22, May 4 and May 23, respectively in 2002. Values within a column followed by a different letter are significantly different at the 0.05 probability level.

表 4 不同处理小麦冠层内 PAR 日截获量、反射量和漏射损失(2002-05-04)

Table 4 Daily amounts of PAR interception, reflex and penetration loss in wheat canopy under different treatments (2002-05-04)

处理 Treatment	反射量 PAR reflex (mol m ⁻² d ⁻¹)	截获量 PAR capture (mol m ⁻² d ⁻¹)			总截获量 Total PAR capture (mol m ⁻² d ⁻¹)	漏射量 PAR penetration loss (mol m ⁻² d ⁻¹)
		60 - 80 cm	40 - 60 cm	0 - 40 cm		
T ₁	2.89	9.80	10.27	16.20	36.27	7.44
T ₂	2.33	13.89	12.54	12.37	38.80	5.47
T ₃	1.80	19.36	13.58	9.03	41.98	2.82
T ₄	1.75	20.09	13.12	8.38	41.59	3.26

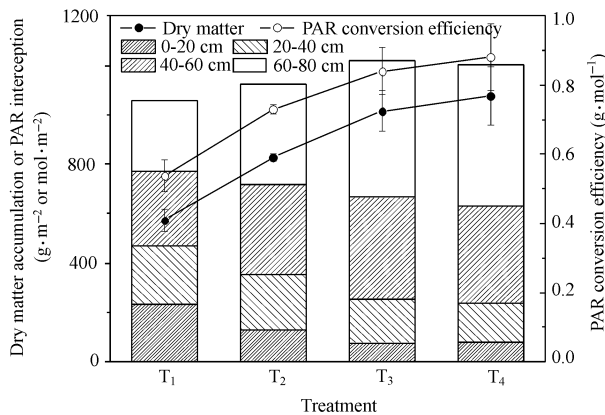


图 4 冬小麦生长后期不同处理冠层 PAR 截获、分布及转化效率和干物质积累变化

Fig. 4 PAR interception, distribution in canopy, conversion efficiency and dry matter accumulation in the later growth stages of winter wheat in the different treatments
Error bars indicate the standard error, i.e. SE.

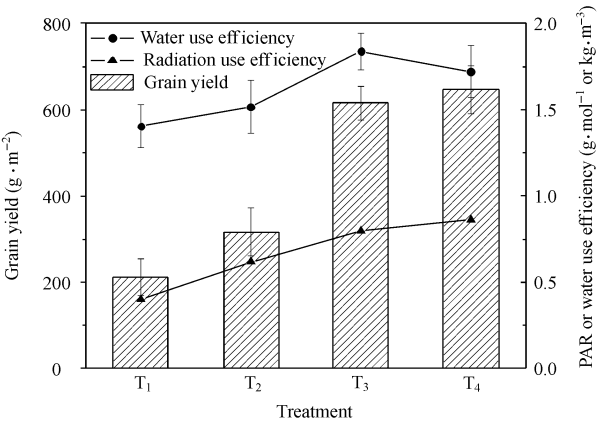


图 5 不同处理冬小麦产量、水分利用效率及生长后期光能利用率变化

Fig. 5 Grain yield, water use efficiency and radiation use efficiency in the late growth stages of winter wheat in the different treatments
Error bars indicate the standard error, i.e. SE.

2.5 冬小麦光能和水利用效率及籽粒产量变化

由图 5 可看出,冬小麦籽粒产量和光能(PAR)利用率分别从 211 g m⁻²和 0.40 g mol⁻¹(T₁)至 616 g m⁻²和 0.80 g mol⁻¹(T₃),增加了 2.9 倍和 2.0 倍,T₄ 仅比 T₃ 增加 5.0 %和 7.5 %,这与生长后期干物质积累状况一致,而水分利用效率变化相对较小,从 1.40 kg m⁻³(T₁)到 1.84 kg m⁻³(T₃),增加 31.4 %,T₄ 却比 T₃ 降低 7.5 %(1.72 kg m⁻³)。可见随着土壤水分的改善,冬小麦水分利用效率随着光能利用率和产量的迅速增加而提高,而当二者增加缓慢时(T₃ 到 T₄)水分利用效率表现为下降。

3 讨论和结论

目前大田作物光能利用效率在 0.1 % ~ 1 % 之间,远低于太阳辐射利用的理论值(5 % ~ 6 %) [10],提高作物光能利用效率(光能截获率 × 光能转化效率)是增产的根本途径 [3]。试验表明,土壤水分胁迫对冬小麦生长后期冠层 PAR 截获量或截获率的影响相对较小(小于 15.7 %,表 4),却显著降低了 PAR 转化效率(图 4),说明冬小麦生育后期与光能转化效率相关的二氧化碳同化和淀粉合成等生理生化过程对土壤水分变化反应极为敏感,这与前人的研究结果一致 [9,11-12]。另一方面由于土壤水分改变了冠

层内叶面积指数的垂直分布(图3)以及叶片叶绿素含量和光合速率等光合性能指标^[13],最终改变了小麦冠层不同层次 PAR 的转化效率。本文结果表明,改善冬小麦生长后期土壤水分对提高冠层上层 PAR 的截获及光能(PAR)的转化效率有重要的作用,这时小麦冠层中下部叶片由于水分胁迫及自身的衰老导致光合性能明显下降,对 PAR 的吸收及转化能力明显降低(T_1 和 T_2),而冠层上部叶片及穗部在水分条件较好的条件下衰老较慢、光合性能高,对 PAR 的吸收及转化能力强(T_3 和 T_4),群体光能利用效率和产量较高。

冬小麦籽粒产量主要来自抽穗后绿色器官制造的光合产物,占70%~80%以上,其中穗部和旗叶(冠层上层)占到60%以上^[13],因此改善冠层上部绿色器官光能(PAR)转化效率对提高光合产物供应能力及其向籽粒的运输效率(收获指数)有重要作用。随着土壤水分的改善,收获指数由0.22(T_1)到0.37(T_3),增加了68.2%,而从 T_3 到 T_4 (0.38)没有明显提高,这与冬小麦生长后期冠层上层(60~80 cm) PAR 截获量及经济产量变化趋势一致(图4和图5)。冬小麦生长后期冠层内 PAR 呈上强下弱分布,是高光效群体的重要结构特征,本试验表明,当冠层上层(60~80 cm)的 PAR 截获率小于35.8%时(T_1 和 T_2),光能转化效率及产量显著降低,而高产群体(T_3 和 T_4)的截获率在50%左右。土壤水分不足使冬小麦群体结构不良,对 PAR 的截获明显下降(表3),更为重要的是加速绿色器官的衰老,使旗叶光合速率以及有关的酶活性明显降低^[17],光能转化效率降低,减产严重。目前提高作物光能利用效率具有很大的潜力,通过改善土壤水分状况可以明显提高小麦光能利用效率(T_3 和 T_4),但是水分利用效率的提前降低成为冬小麦对其他资源高效利用的限制因素,因此在水资源短缺且分配不均的华北地区在注重提高作物光能利用效率及产量的同时,应该选育水分利用效率高的品种,以提高作物对其他资源(光、温和肥料)的利用效率。

许多试验表明作物产量与光能截获量成正相关^[2,10,13],本试验也得到一致的结论(图4)。但是土壤水分胁迫导致冬小麦生长后期光能利用效率及产量下降主要原因不是冠层对 PAR 截获的减少,而是冠层 PAR 转化效率的降低,这与生长后期冠层上层

(60~80 cm)对 PAR 的截获率(量)及其光合性能密切相关。维持冬小麦生长后期冠层上层 PAR 截获率在50%左右是实现小麦高产高光效的重要指标。随着土壤水分改善,冬小麦生长后期光能利用效率及产量增加趋势逐渐变缓,而水分利用效率却提前降低,成为进一步提高其他资源利用效率的限制因素。在底墒充足的条件下,在拔节期和抽穗期分别灌溉60 mm可以获得较高的水分和光能利用效率,可作为该地区较合理的灌溉方案。

References

- [1] Liu C-M(刘昌明), He X-W(何希吾). Strategy on Water Problems of 21st Century in China (中国水问题方略). Beijing: Science Press, 1996. pp 45~50 (in Chinese)
- [2] Feng H-C(逢焕成), Wang S-Q(王慎强). Colony production and radiation use. *Plant Physiol Commun* (植物生理学通讯), 1998, 34 (2): 149~154 (in Chinese with English abstract)
- [3] Huang G-B(黄高宝). A review of the researches of crop colony structure and light distribution in relation to crop productivity. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 1999, 18 (1): 59~65 (in Chinese with English abstract)
- [4] Huang G-B(黄高宝). Development of light utilization theory for wheat/corn intercropping in condition of intensive cultivation. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1999, 25 (1): 15~24 (in Chinese with English abstract)
- [5] Zhao H-J(赵会杰), Li Y(李有), Zou Q(邹琦). A comparative study on characteristics of radiation and photosynthesis in canopy of two different spike-type cultivars of wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2002, 28 (5): 654~659 (in Chinese with English abstract)
- [6] Chen Y-H(陈雨海), Yu S-L(余松烈), Yu Z-W(于振文). Relationship between amount and distribution of PAR interception and grain output of wheat communities. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2003, 29 (5): 730~734 (in Chinese with English abstract)
- [7] Fang Q-X(房全孝), Chen Y-H(陈雨海), Li Q-Q(李全起), Yu S-Z(于舜章), Yu S-L(余松烈), Luo Y(罗毅), Yu Q(于强), Our-Yang Z(欧阳竹). Effects of irrigation on photosynthate supply and conversion and related enzymes activity during grain filling period. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2004, 30 (11): 1113~1118 (in Chinese with English abstract)
- [8] Williams J H, Boot K J. Physiology and modeling predicting the unpredictable legume. In: Pattee H E, Stalker H T ed. *Advances in Peanut Science*. Am Peanut Res Educ Soc, Stillwater, OK, 1995. pp 301~353
- [9] Whitfield D M, Smith C J. Effects of irrigation and nitrogen on growth, light interception and efficiency of light conversion in wheat. *Field Crops Res*, 1989, 20: 279~295
- [10] Gardner F P, Pearce R B, Mitchell R L. *Physiology of Crop Plants* (作物生理学). Yu Z-W(于振文), Cui D-C(崔德才) trans. Beijing: Agriculture Press, 1993. pp 29~60 (in Chinese)
- [11] Chernyadev I I, Monakhova O F. The activity and content of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in wheat plants as affected by water stress and karstolone. *Photosynthetica*, 1998, 35 (4): 603~610
- [12] Xu Z-Z(许振柱), Yu Z-W(于振文), Qi X-H(齐新华), Yu S-L(余松烈). Effect of soil drought on ethylene evolution, polyamine accumulation and cell membrane in flag leaf of winter wheat. *Acta Phytophysiol Sin* (植物生理学报), 1995, 21 (3): 295~301 (in Chinese with English abstract)
- [13] Xu H-Y(徐恒永), Zhao J-S(赵君实). Canopy photosynthesis capacity and the contribution from different organs in high yielding winter wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1995, 21 (2): 204~209 (in Chinese with English abstract)