

# 栽培模式、施氮和品种对冬小麦冠层结构和产量的影响\*

任书杰<sup>1,2,4</sup> 李世清<sup>1,3\*</sup> 王全九<sup>2</sup> 李生秀<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; <sup>2</sup> 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; <sup>3</sup> 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; <sup>4</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 在黄土高原南部半湿润易旱区土垫旱耕人为土上进行大田试验, 研究氮肥、品种和栽培模式对冬小麦叶面积指数(LAI)和透光率(DIFN)及产量的影响。结果表明, 小麦生长过程中 LAI 先增大后减小, 在开花期最大, 成熟期最小, 施氮能够显著增加 LAI; DIFN 的变化规律与 LAI 相反。不同品种间 LAI 和 DIFN 差异显著。全程覆膜和覆膜 150 d 的 LAI 极显著大于常规栽培、集雨面栽培和三密一稀栽培模式, DIFN 与此相反; 施氮后籽粒产量极显著增加。在不同栽培模式下, 以全程覆膜、覆膜 150 d 和集雨面栽培模式的产量较高, 但从维持土壤质量角度考虑, 则覆膜 150 d 和集雨面 2 种栽培模式优于其它几种栽培模式; 从冠层结构特征分析, 这 2 种栽培模式更有利于增加群体光合能力。

**关键词** 栽培模式, 叶面积指数, 透光率, 冬小麦, 产量

中图分类号 Q945.11 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2006)12-1449-06

**Effects of cultivation mode, nitrogen fertilization, and cultivar on winter wheat canopy parameters and grain yields in sub humid area.** REN Shujie<sup>1,2,4</sup>, LI Shiqing<sup>2,3</sup>, WANG Quanjiu<sup>2</sup>, LI Shengxiu<sup>3</sup> (<sup>1</sup> State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; <sup>2</sup> Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>3</sup> College of Resource and Environmental Science, Northwest Sci Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; <sup>4</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1449~1454.

A field experiment was conducted on the Earth Cumulic Orthic Anthrosols in south Loess Plateau to investigate the effects of nitrogen fertilization, cultivar, and cultivation mode on the leaf area index (LAI), diffuse norr interceptance (DIFN), and grain yield of winter wheat. The results showed that during the growth period, LAI increased first and decreased then, which was the highest in flowering but the lowest in maturing stage. Nitrogen fertilization improved the LAI significantly. DIFN had a change pattern reverse to LAI. There were significant differences in LAI and DIFN among cultivars. The LAI under plastic film mulching for whole growth period (PFMW) and plastic film mulching for 150 d (PFMD) was significantly higher than that under other three cultivation modes, while DIFN was in reverse. Nitrogen fertilization increased grain yield significantly. The grain yield under PFMW, PFMD, and rainfall harvest cultivation was higher than that under other two cultivation modes, but from the viewpoints of grain yield, canopy parameters, and soil quality, PFMW and PFMD were better than the other three cultivation modes.

**Key words** cultivation mode, leaf area index, diffuse norr interceptance, winter wheat, yield.

## 1 引言

农田生态系统作物冠层结构状况直接影响作物产量。冠层结构可表征冠层内部生长优劣, 一般可用透光率(即天空可见度 diffuse norr interceptance, DIFN)、叶面积指数(leaf area index, LAI)和叶倾角(mean tilt angle, MTA)等指标表示, 这些指标因品种、栽培模式、养分供应以及气候环境不同而异。傅兆麟等<sup>[1]</sup>研究表明, 在一定范围内叶面积与产量密

切相关, 同时发现<sup>[20]</sup>, 高产小麦品种灌浆中期到灌浆结束, 有较高的叶面积指数。雷振生等<sup>[21]</sup>报道, 不同产量型品种叶面积指数不同, 低产型品种叶面积指数较低; 也有研究指出, 群体光合能力显著受叶面积指数影响<sup>[16]</sup>。种植密度过高时, 虽然有较高的

\* 国家自然科学基金(30571116, 30230230)、西北农林科技大学创新团队、中国科学院百人计划和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目(10501-146)。

\*\* 通讯作者

收稿日期: 2006-03-14 接受日期: 2006-09-01

叶面积指数,但因透光率较低,不仅光合能力下降,而且衰老加快<sup>[15]</sup>。因此,建立合理群体结构,兼顾透光率和叶面积指数,对增加群体光合能力具有重要意义。位于黄土高原南部的关中平原,土层深厚,土壤肥力较高,是西北地区重要冬小麦产地之一。在冬小麦生长期降水较少,水分胁迫严重影响小麦产量<sup>[4, 22, 25, 26, 29]</sup>,因此如何有效利用降水资源,是农业生产中急需解决的问题。近年发展起来的地膜覆盖和集雨面栽培技术,为充分利用降水资源提供了有效途径。但这些栽培模式对冬小麦冠层结构有何影响,其定量化研究报道并不多见。本实验通过田间试验,研究地膜覆盖和集雨面栽培对作物冠层结构参数的影响,分析不同栽培模式冬小麦冠层结构参数与产量的关系,为选择适宜于本地区的栽培模式提供理论依据。

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 自然概况

试验在西北农林科技大学土壤肥料试验站进行。试验站位于黄土高原南部半湿润易旱区,海拔 520 m 左右,属大陆性季风气候,冬小麦生育期 > 5 °C 积温 1 000 °C~ 1 300 °C,年均气温 12.9 °C;年均降水量 632 mm,分布不均,主要集中在 7~ 9 月,冬春易旱,年蒸发量 1 400 mm,地下水埋深 > 60 m。作物轮作方式主要为冬小麦-夏玉米。供试土壤为土垫旱耕人为土,其剖面层次大体可划分为耕作层(0~ 20 cm)、粘化层(20~ 60 cm)和母质层(60~ 200 cm)。冬小麦播种前休闲。供试土壤基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Tab. 1 Physicochemical properties of experimental soil

土层 (cm)	有机质 (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 (g kg <sup>-1</sup> )	有效磷 (μg g <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (μg g <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (μg g <sup>-1</sup> )	非交换态铵 (μg g <sup>-1</sup> )
0~ 20	11.5	1.25	5.42	18.55	5.14	221.4
20~ 40	9.1	0.98	4.46	22.85	2.43	208.9
40~ 60	6.7	0.78	3.28	5.85	2.57	200.5
60~ 80	5.0	0.61	4.76	7.85	1.55	204.7
80~ 100	4.6	0.54	2.37	8.04	3.68	207.4

### 2.2 试验设计

本试验设 2 个施氮水平:不施氮和施氮(120 kg · hm<sup>-2</sup>),以含氮量为 46% 的尿素为氮源;5 种栽培模式:常规栽培(对照)、全程覆膜(即全生育期地膜覆盖)、覆膜 150 d(播种后地膜覆盖 150 d,即在冬小麦拔节前后期地膜覆盖,之后揭去地膜)、三密一稀(每播种 3 行空闲 1 行)和集雨面栽培(集雨面:种植面

= 40: 80); 2 个小麦品种,小偃 503 和小偃 22; 采用完全方案,共 20 个处理,重复 3 次;小区面积为 12 m<sup>2</sup>(3.6 m × 3.3 m)。播种时带尺点播,株距 3 cm,行距 20 cm。底肥按 100 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg · hm<sup>-2</sup> 施肥量施入普通过磷酸钙。2002 年 10 月 10 日播种,2003 年 5 月 31 日收获。因播种时干旱,在 10 月 16 日各小区均补灌 12.5 mm 水,其余时期均未灌溉。

### 2.3 测定项目

根据小麦冠层情况,从小麦冠层刚好盖过地面的 2003 年 4 月 8 日起,按生育期用 LI- 2000 型便携式冠层测定系统测定冠层结构参数。测定在试验田没有阳光时进行,即早晨日出前或傍晚日落后,或者在阴天的白天。主要测定指标包括透光率(DIFN)和叶面积指数(LAI);对三密一稀和集雨面栽培,每小区测 2 次,1 次测定作物密集部分,1 次测定空行或者集雨面部分,并按加权平均计算该小区 DIFN 和 LAI。小麦成熟后,各小区人工按行收获,折算收获面积后计产。

## 3 结果与分析

### 3.1 栽培模式、氮肥和品种对冠层结构参数的影响

3.1.1 冬小麦冠层结构参数随生育期的变化 以不同栽培模式、施氮和品种处理平均结果评价冬小麦不同生育期冠层结构参数,即 DIFN 和 LAI 的变化特征(图 1)。结果表明,本实验条件下,小麦冠层透光率(DIFN)随生育期推进呈现出先变小后增大的趋势(图 1)。小麦在拔节后生长发育逐渐旺盛,随生育期推进,DIFN 首先逐渐变小,在开花期达到最小值;开花期后又逐渐增大,成熟期达到最大,该变化趋势显然与冬小麦在生长发育后期叶片逐渐衰老、干枯有关。小麦叶面积指数(LAI)与 DIFN 的变化趋势基本相反(图 1)。LAI 在开花期达到最大值(1.74),原因在于与拔节期后叶片数逐渐增多、叶面积增大有关;之后随生育期推进,LAI 逐渐减小,成熟期达到最小值(1.24),与其它各个时期的差异达到极显著水平,其原因与对 DIFN 的影响相同。

3.1.2 不同小麦品种冠层结构的差异 小偃 22 的 DIFN(平均为 0.479)极显著大于小偃 503(平均为 0.442)( $P < 0.01$ )。2 个小麦品种 DIFN 随生育期变化趋势相同(图 2),表现为先减小后增大的趋势:在开花期均出现最小值:小偃 22 为 0.456,小偃 503 为 0.418;在成熟期均达到最大,小偃 22 为 0.510,小偃 503 为 0.484。在整个测定阶段,小偃

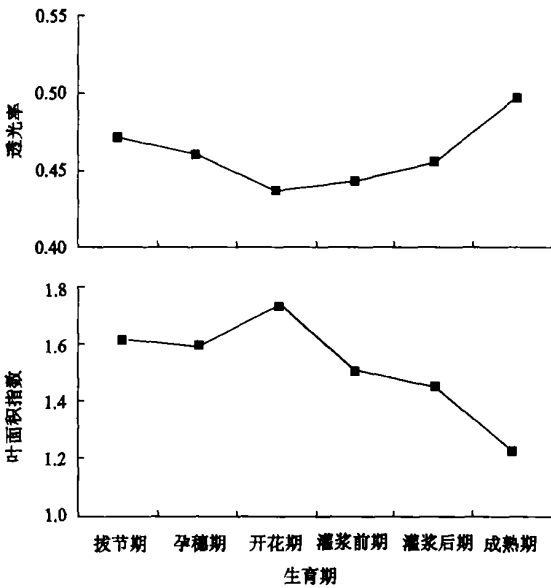


图1 冬小麦当层结构参数随生育期的变化  
Fig.1 Variation of winter wheat canopy parameters with growth periods

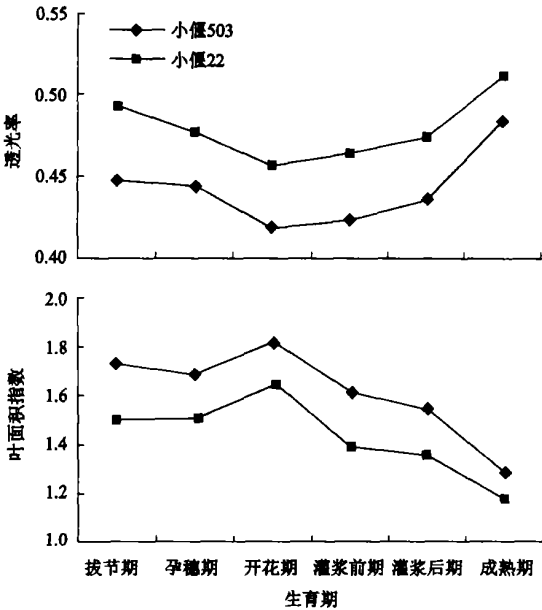


图2 不同小麦品种冠层结构参数随生育期的变化  
Fig.2 Variation of canopy parameters of different wheat cultivars with growth periods

22的DIFN明显大于小偃503,说明小偃22冠层透光性强,产生差异的主要原因与小偃503分蘖性强,分蘖数多有关,而小偃22与此相反。

小偃503的LAI极显著大于小偃22( $P < 0.01$ )。从全生育期平均看,小偃503的LAI为1.62,小偃22为1.43,相差0.19。2个小麦品种的LAI均呈现先增大后减小的趋势(图2b):开花期达到高峰,成熟期最小。小偃503和小偃22在开花期

的LAI分别为1.83和1.64;在成熟期分别为1.29和1.19;在整个测定阶段,小偃503的LAI始终大于小偃22,产生这种差异显然与2个品种的分蘖不同有关。

3.1.3 施氮对冠层结构的影响 施氮对冠层结构参数的影响见图3。图3a表明,施氮后冠层DIFN显著减小。氮肥对DIFN的影响主要与施氮促进了分蘖和叶片发育有关,施氮后植株生长旺盛,从而减小了冠层DIFN。不施氮小麦DIFN随生育期变化呈现先减后增的趋势,以开花期最小,成熟期和拔节期较大;施氮后冠层DIFN在灌浆前变化不大,比较平稳,但进入灌浆期后,随生育进程推进而增加,且增加幅度大于不施氮处理。

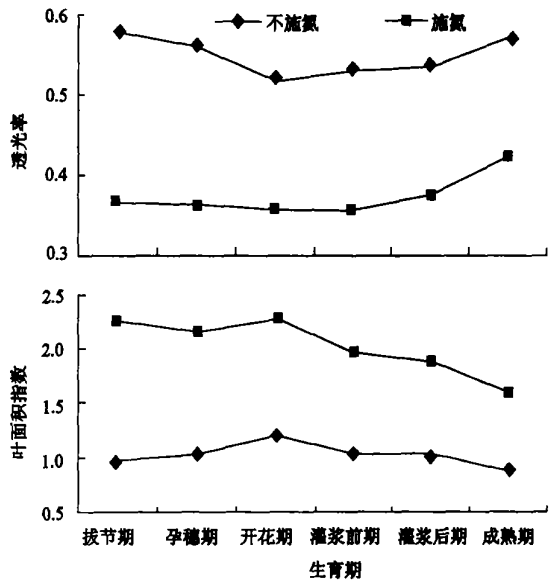


图3 施氮对冬小麦当层结构参数随生育期变化的影响  
Fig.3 Variation of canopy parameters of winter wheat with growth periods after applied nitrogen fertilizer

对不施氮处理,小麦在生长后期叶片衰老较快,叶片又少,DIFN变化相对较小,而对施氮处理,叶片数多,生长后期衰老较慢,DIFN变化相对较大。施氮对LAI的影响与对DIFN的影响相反。施氮可明显增加冠层LAI(图3b)。从拔节到成熟,虽然施氮与不施氮处理冠层LAI呈现出相同的变化趋势,但施氮处理LAI在各生育期均显著大于不施氮处理。2个施氮处理的LAI均在开花期达到最大值,不施氮与施氮处理的LAI分别为1.20和2.27。不施氮时LAI变化相对较小,施氮后LAI变化相对较大,这与对DIFN变化特征的影响基本相同。施氮对LAI的影响比品种对LAI的影响更加显著,施氮处理LAI为2.07,不施氮处理LAI为1.02,施氮增加

1.05 (102.3%) ( $P < 0.01$ )。

施氮虽然能够明显减小小麦冠层 DIFN 和增加 LAI, 但不同小麦品种冠层结构对施氮的反应不同。本研究结果表明, 小偃 22 和小偃 503 的 DIFN 和 LAI 对氮肥反应的敏感性不同(图 4)。施氮后小偃 22 的 DIFN 和 LAI 变化较大, 而小偃 503 的变化相对较小, 说明小偃 22 冠层结构参数对氮肥反应较为敏感。

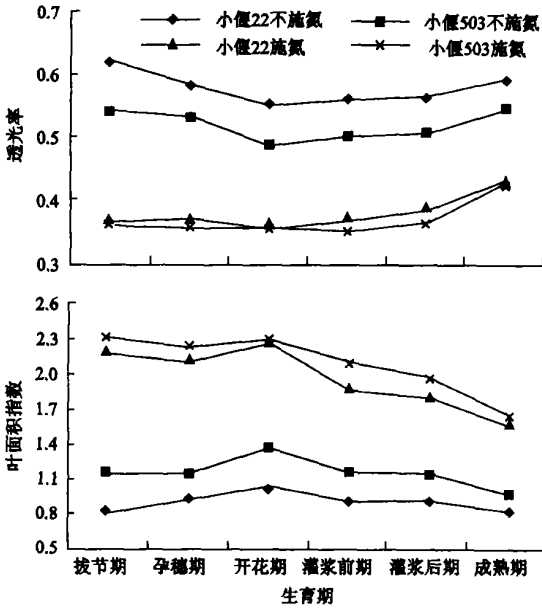


图 4 不同小麦品种冠层结构参数对施氮的反应  
Fig. 4 Response of different wheat cultivars' canopy parameters to nitrogen application

**3.1.4 不同栽培模式对冠层结构的影响** 从图 5 看出, 虽然不同栽培模式冠层 DIFN 的变化趋势基本相同, 均为先减后增, 但不同栽培模式的 DIFN 存在极显著差异(表 2), 覆膜 150 d 和全程覆膜 2 种栽培模式的 DIFN 在各个生育期均低于常规、三密一稀和集雨面栽培, 显然与覆膜加大了植株冠层有关。在常规栽培、三密一稀栽培和集雨面栽培中, 常规栽培和三密一稀栽培的 DIFN 变化一致, 均为开花期最小, 而集雨面栽培在灌浆前期最小, 产生这种差异的原因是否与集雨面沟内土壤水分状况较好, 总体种植密度较小, 并且后期养分供应状况相对较好, 导致小麦叶片衰老推后有关, 还有待于进一步研究。不同栽培模式间的 LAI 也存在极显著差异( $P < 0.01$ )。覆膜 150 d 和全程覆膜栽培的 LAI 显著大于其它 3 种栽培模式, 这与覆膜后植株生长旺盛有关; 集雨面栽培的 LAI 变化曲线较平缓, 说明该栽

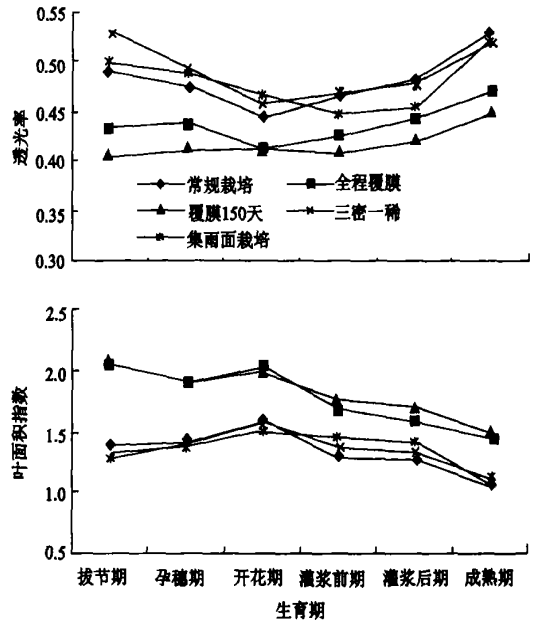


图 5 不同栽培模式下冬小麦冠层结构参数随生育期的变化  
Fig. 5 Variation of winter wheat canopy parameters with growth periods under different cultivation modules

表 2 不同栽培模式下 LAI 和 DIFN 的显著性比较(新复极差法)  
Tab. 2 Significance comparison of LAI and DIFN under different cultivation models

栽培模式	LAI	DIFN
覆膜 150d	1.82A	0.419B
全程覆膜	1.78A	0.436B
集雨面栽培	1.36B	0.479A
三密一稀	1.34B	0.490A
常规栽培	1.33B	0.479A

注: 同列不同字母表示差异达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

培模式有利于延缓植物生长后期叶片的衰老和干枯。

**3.2 栽培模式、氮肥和品种对产量的影响**

不同小麦品种平均看产量存在一定差异, 小偃 22 为  $3\ 657\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 小偃 503 为  $3\ 264\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 小偃 22 比小偃 503 增加 12%, 差异达 10% 显著水平( $P = 0.07$ )。在本试验条件下, 施氮能够极显著增加籽粒产量( $P < 0.0001$ ), 不施氮产量平均为  $2\ 509\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 施氮后平均为  $4\ 412\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 施氮比不施氮增加 75.8%。施氮对小偃 22 和小偃 503 的增产量不同, 但增产率基本一致: 小偃 22 不施氮时产量为  $2\ 642\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 施氮后为  $4\ 672\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 施氮增产  $2\ 030\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (76.8%); 小偃 503 不施氮时产量为  $2\ 376\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 施氮后为  $4\ 182\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 施氮增产  $1\ 805\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (74.7%)。

不同栽培模式籽粒产量存在明显差异, 从全程覆膜(产量为  $3\ 944\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 覆膜 150 d ( $3\ 680\ \text{kg}$

•  $\text{hm}^{-2}$  )、集雨面 ( 3 618  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  )、常规 ( 3 053  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ) 到三密一稀 ( 3 009  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ), 产量依次下降; 与常规栽培相比, 全程覆膜、覆膜 150 d、集雨面和三密一稀栽培分别增产 29. 2%、20. 6%、18. 5% 和 - 1. 4%。方差分析表明, 不同栽培模式间籽粒产量存在显著差异 ( $P < 0. 05$ ), 全程覆膜与常规栽培、三密一稀栽培间差异显著, 但与覆膜 150d 和集雨面栽培间差异不显著 (图 6), 从产量角度考虑, 以覆膜和集雨面栽培模式较好。

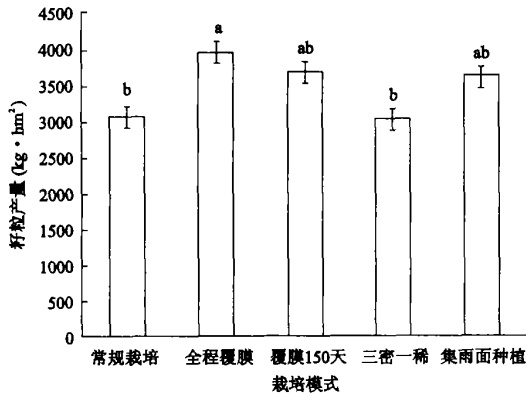


图 6 不同栽培模式下的产量比较

Fig. 6 Comparison of wheat grain yield under different cultivation models

#### 4 讨论

透光率(DIFN)是表征冠层结构性特征的一个重要指标,它反映着光线透过冠层的多少,DIFN与冠层内部光照呈正相关关系,与LAI呈负相关关系。张雷明等<sup>[9]</sup>研究表明,不同施氮水平小麦在不同生育期群体DIFN的变化趋势基本一致,各时期变化曲线随施氮量增加呈先增加后降低再上升的趋势,氮素营养对小麦群体DIFN的调控作用在生长后期明显大于前期。

叶面积指数(LAI)是另一表征冠层参数的重要变量,对研究作物生长发育和产量形成具有十分重要的意义<sup>[6]</sup>。一般而言LAI是指作物群体在单位土地面积上的总绿叶面积,它的动态变化不仅可以反映作物生长发育状况,而且更重要的是能够评价对作物产量形成起有决定作用功能叶片的大小及寿命长短;同时LAI还可反映作物群体蒸腾状况,一般而言,当土壤含水量变化不大时,相对蒸散量随LAI增加而呈线性增加<sup>[3]</sup>。毛学森等<sup>[1]</sup>研究表明,冬小麦的LAI与植被指数存在高度线性相关,不同小麦品种植被指数表现出基本一致的季节性变化特

点;还有研究发现<sup>[9]</sup>,在一定氮肥用量范围内,小麦群体结构随施氮量增加而改善,但当施氮量超过一定量时反而不利于群体结构和功能的改善;王勇<sup>[2]</sup>研究表明,旱地地膜冬小麦的LAI随底墒增加而增大。还有研究发现<sup>[17]</sup>,小麦相对LAI与相对产量呈显著正相关,且不同栽培模式的LAI不同<sup>[5,7,8,23]</sup>。Gao等<sup>[23]</sup>研究表明,地膜覆盖栽培有利于促进LAI增加。

本研究发现,不同品种、施氮水平和栽培模式下的LAI存在极显著差异,与汤永禄等<sup>[7]</sup>的研究相一致。栽培模式主要通过影响单株叶片状况和群体结构而影响冠层特征值,全程覆膜和覆膜150d2种栽培模式的LAI极显著大于常规栽培、集雨面栽培和三密一稀栽培。集雨面栽培模式后期LAI减小较慢,可以使小麦叶片保持较长的功能期。而全程覆膜和覆膜150d栽培的DIFN小于常规栽培和三密一稀栽培模式。从籽粒产量看,全程覆膜、覆膜150d和集雨面3种栽培模式均高于常规栽培和三密一稀栽培模式。在干旱条件下,全程覆膜、覆膜150d和集雨面栽培3种栽培模式由于有较好的保水蓄水作用,因此覆膜与集雨面栽培模式较其它栽培模式更优。

地膜覆盖后,地膜与土壤间形成了一道物理阻隔,膜下土壤至作物冠层形成了一个相对独立的微生态系统,温、光、水、肥和气等生态因子均发生变化。但是,地膜覆盖增产的主要机制在于改善了土壤生态环境,即通过影响土壤水、热状况而活化土壤养分<sup>[11,24,28]</sup>,提高了养分有效性及利用效率<sup>[27]</sup>。有研究表明,对地膜覆盖特别是连续覆盖,有时因土壤水分和养分过分耗竭,后期会出现严重脱水、脱肥现象<sup>[24,30]</sup>,导致收获指数和产量下降<sup>[10,18]</sup>;同时,地膜覆盖的增产作用在一定程度上是以耗竭土壤肥力,特别是土壤有机物质为代价<sup>[11,12]</sup>。陈锡时等<sup>[14]</sup>研究表明,地膜覆盖增加了表层土壤微生物数量,活性增强,使养分消耗加快。因此,如果地膜覆盖技术应用不当,长期连续覆膜必然恶化土壤生态条件,难以持续高产<sup>[13]</sup>。

从对作物冠层特征的影响考虑(表2),集雨面栽培的LAI显著小于覆膜150d栽培,表明有效光合面积较小,但因前者DIFN显著大于后者,说明前者冠层透光性好,有利于增加叶片光合能力,因此,对集雨面栽培而言,较高的光合能力在一定程度上补偿了有效光合面积的减少;对覆膜150d栽培,虽

然透光性较差,但因有效光合叶面积较大,因此较大的有效光合叶面积在一定程度上补偿了光合强度的下降。以上分析表明,这2种栽培模式可有效兼顾DIFN和LAI,有利于增加群体光合能力。从不同栽培模式对籽粒产量的影响分析,全程地膜覆盖虽然没有减产(图6),但从维持土壤质量和作物根系后期活性角度考虑,对覆膜栽培,由于全程覆膜和覆膜150d的籽粒产量差异不显著,在实际生产中应选择覆膜150d栽培模式;同时由于覆膜150d和集雨面栽培间的籽粒产量基本相同,二者之间没有显著差异。在半湿润和半干旱地区,覆膜150d和集雨面栽培由于前期有较好的保水作用,同时又可避免全生育期覆盖造成的不良影响,因此,这2种栽培模式具有较好发展前景。

## 参考文献

- [1] 毛学森,张永强,沈彦俊. 2003. 冬小麦植被指数变化及其影响因子初探[J]. 中国生态农业学报, 11(2): 35~36.
- [2] 王勇. 2003. 旱地地膜冬小麦播前底墒对产量效应的研究[J]. 中国生态农业学报, 11(3): 117~120.
- [3] 王靖,李湘阁,刘恩民,等. 2003. 华北平原冬小麦相对蒸散与叶面积指数及表层土壤含水量的关系[J]. 中国生态农业学报, 11(2): 32~34.
- [4] 石岩,林琪,李素美,等. 1998. 土壤水分胁迫对小麦养分分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 4(1): 50~56.
- [5] 艾应伟,陈实,张先婉,等. 1997. 垄作不同土层施肥对小麦生长及氮肥肥效的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 3(3): 255~261.
- [6] 刘铁梅,曹卫星,罗卫红,等. 2001. 小麦叶面积指数的模拟模型研究[J]. 麦类作物学报, 21(2): 38~41.
- [7] 汤永禄,黄钢. 2003. 免耕露播稻草覆盖栽培小麦的生物学效应分析[J]. 西南农业学报, 16(2): 37~41.
- [8] 张淑香,金柯,蔡典雄,等. 2003. 水分胁迫条件下不同氮磷组合对小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 9(3): 276~279.
- [9] 张雷明,杨君林,上官周平. 2003. 旱地小麦群体生理变量对氮素供应量的响应[J]. 中国生态农业学报, 11(3): 63~65.
- [10] 李凤民,王俊,郭安红. 2000. 供水方式对根源信号与春小麦水分利用效率[J]. 水利学报, 20(3): 510~513.
- [11] 李世清,李凤民,宋秋华,等. 2001. 半干旱地区地膜覆盖对土壤氮素有效性的影响[J]. 生态学报, 21: 1519~1526.
- [12] 汪景宽,须湘成,张旭东,等. 1994. 长期地膜覆盖对土壤磷素状况的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 25(3): 311~315.
- [13] 沈新磊,黄思光,王俊,等. 2003. 半干旱农田生态系统地膜覆盖模式和施氮对小麦产量和氮效率的效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 31(1): 1~14.
- [14] 陈锡时,郭树凡,汪景宽,等. 1998. 地膜覆盖栽培对土壤微生物种群和生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 9(4): 435~439.
- [15] 赵会杰,郭天财,刘华山,等. 1999. 大穗型高产小麦群体的光照特征和生理特性研究[J]. 河南农业大学学报, 33(2): 101~105, 155.
- [16] 徐恒永,赵君实. 1995. 高产冬小麦的冠层光合能力及不同器官的贡献[J]. 作物学报, 21(2): 204~209.
- [17] 康建宏,何文寿,张晓岗,等. 2000. 春小麦NPK营养效率基因型差异的生理机理研究II. 光合能力的基因型差异[J]. 宁夏农学院学报, 21(2): 33~39.
- [18] 黄义德,张自立,魏凤珍,等. 1999. 水稻覆膜旱作的生理生态效应[J]. 应用生态学报, 10(3): 305~308.
- [19] 傅兆麟,孙其信. 2002. 小麦超高产基因型冠层结构有关问题的研究[J]. 淮北煤炭师范学院学报, 25(1): 32~36.
- [20] 傅兆麟,孙其信. 2002. 超高产基因型小麦冠层叶片生理特性及与有关产量性状的关系[J]. 南京农业大学学报, 25(2): 16~20.
- [21] 雷振生,林作楫,杨会民,等. 1996. 黄淮海区高产小麦品种的产量结构及其生理基础的研究[J]. 华北农学报, 11(1): 70~75.
- [22] 蔺海明,牛俊义,秦舒浩. 2001. 陇中半干旱区小麦和玉米补灌效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 19(4): 80~86.
- [23] Gao ZQ, Yin J, Miao GY, et al. 1999. Effects of tillage and mulch methods on soil moisture in wheat fields of Loess Plateau, China [J]. *Pedosphere*, 9(2): 161~168.
- [24] Li FM, Guo AH, Wei H. 1999. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat [J]. *Field Crops Res.*, 63: 79~86.
- [25] Li WL, Li WD, Li ZZ. 2004. Irrigation and fertilizer effects on water use and yield of spring wheat in semi arid regions [J]. *Agric. Water Manage.*, 67: 35~46.
- [26] Li WL, Li ZZ, Li WD. 2004. Effect of the niche-fitness at different water supply and fertilization on yield of spring wheat in farmland of semi arid areas [J]. *Agric. Water Manage.*, 67: 1~13.
- [27] Mohapatra BK, Lenka D, Naik D. 1998. Effects of plastic mulching on yield and water use efficiency in maize [J]. *Ann. Agric. Res.*, 19: 210~211.
- [28] Quezada M, Marian R, Munguia L, et al. 1995. Plastic mulching and availability of soil nutrients in cucumber crop [J]. *TERRA (Mexico)*, 13: 136~147.
- [29] Tao L, Ren J. 2004. Wheat growth and yield under different depth film bottomed cultivation in sandy land [J]. *Soil Tillage Res.*, 76: 139~145.
- [30] Zaogo CGL, Wendt CW, Lascano RJ, et al. 1997. Interactions of water, mulch and nitrogen on sorghum in Niger [J]. *Plant Soil*, 197: 119~126.

作者简介 任书杰,女,1976年生,博士研究生,主要从事陆地生态系统碳氮循环研究。E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn  
责任编辑 李凤芹