植物营养与肥料学报 2013,19(1):1-10
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi:10.11674/zwyf.2013.0101

^{15}N 示踪法研究弱光对不同穗型冬小麦氮素积累和转运的影响

徐彩龙[1],王振林[1*],尹燕枰[1],蔡瑞国[2],王 平[1,3],
郭俊祥[4],李 勇[1],翟学旭[1],刘铁宁[1]

(1 山东农业大学,作物生物学国家重点实验室,山东泰安 271018;2 河北科技师范学院生命科技学院,河北秦皇岛 066600;3 山东省泰安市农科院,山东泰安 271000;4 黑龙江省农垦科学院植保所,黑龙江哈尔滨 150038)

摘要:在大田试验条件下,采用^{15}N 示踪法,设置不遮光(T0)、开花后 1 ~ 10 d 遮光(T1)、开花后 11 ~ 20 d 遮光(T2)和开花后 21 ~ 30 d 遮光(T3)4 个处理,每个处理设置^{15}N 尿素作底肥 + 普通尿素作追肥和普通尿素作底肥 + ^{15}N 尿素作追肥两个^{15}N 示踪的微区,研究灌浆期弱光条件下不同穗型小麦品种对不同来源氮素的吸收、分配、转运和氮素利用效率的影响。结果表明,灌浆期不同阶段遮光均不利于植株对氮素的吸收、积累和转运,品种间表现一致,呈 T0 > T3 > T2 > T1 规律;小麦植株吸收的氮素 68.0 % ~ 71.39 % 来自土壤氮,对追施氮的吸收量大于底施氮,灌浆期遮光增加了土壤氮素在营养器官的分配比例,不利于营养器官中土壤氮素向籽粒中的转运;各处理籽粒产量、肥料氮吸收量、氮肥利用率和肥料偏生产力均表现为 T0 > T3 > T2 > T1。相同处理条件下,济麦 22 籽粒产量和对肥料的利用大于山农 8355。小麦灌浆期阶段性遮光降低了植株对氮素的吸收、转运和籽粒产量,以灌浆前期遮光影响最大,中期次之,后期最小;相同遮光条件下济麦 22 的籽粒产量和氮素利用率较高。

关键词:冬小麦;^{15}N 示踪;遮光;氮素吸收分配;氮素利用效率
中图分类号:S512.01;S124 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)01-0001-10

Effect of shading on nitrogen accumulation and translocation of winter wheat with different spike types using ^{15}N tracer technique

XU Cai-long[1], WANG Zhen-lin[1*], YIN Yan-ping[1], CAI Rui-guo[2], WANG Ping[1,3]
GUO Jun-xiang[4], LI Yong[1], ZHAI Xue-xu[1], LIU Tie-ning[1]

(*1 Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China; 2 Life Science and Technology College, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao, Hebei 066600, China; 3 Tai'an Academy of Agricultural Sciences, Tai'an, Shandong 27100, China; 4 Institute of Plant Protection, Heilongjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Harbin, Heilongjiang 150038*)

Abstract: Shading post flowering caused by cloudy weather and the surrounding protective trees often occurs in the Huang-Huai-Hai Plain of China. In the present study, two winter wheat cultivars with different spike types, a large-spike cultivar of Shannong8355 and a multiple-spike cultivar of Jimai22, were used to evaluate the effects of shading at different grain-filling stages on nitrogen accumulation and translocation by using ^{15}N tracer technique. There were four shading treatments, shading from day 1 to day 10 after the anthesis (T1), shading from day 11 to day 20 after the anthesis (T2), shading from day 21 to day 30 after the anthesis (T3) and no shading (T0). The results indicate that the shading at different grain-filling stages decreases the uptake and translocation of N of the two cultivars which are in the order: T0 > T3 > T2 > T1. The amounts of nitrogen derived from soil range from 68.0% -71.39% and the percentages of nitrogen derived from the basal fertilizer in the vegetative organs are lower

收稿日期:2012-05-25 **接受日期**:2012-09-07
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB118602);国家公益性行业(农业)科研专项(201203100)资助。
作者简介:徐彩龙(1986—),男,河北栾城人,硕士研究生,主要从事小麦高产优质生理生态研究工作。E-mail:xucailong0504@163.com
* 通信作者 E-mail:zlwang@sdau.edu.cn

than those derived from the topdressing fertilizer. The shading at different grain-filling stages increases the absorption amount and proportion of soil N in the vegetative organs, and inhibits translocation of those to the grain. The grain yield, N uptake from fertilizer, fertilizer N use efficiency and partial factor productivity from fertilizer N at different grain-filling stages are also in order: T0 > T3 > T2 > T1. In conclusion, the shading at different filling stages decreases the uptake and translocation of N and grain yield, and the uptake and translocation are highest under the shading at the early filling stage and the lowest at the later filling stage. Under the same shading condition, the grain yield and N use efficiency of Jimai22 are higher than those of Shannong 8355.

Key words: winter wheat; ^{15}N tracer; shading; nitrogen uptake and distribution; nitrogen use efficiency

我国是世界氮肥生产、消费大国,氮肥农田利用效率低,残留在土壤和进入大气的氮素降低了氮肥的增产效果[1]。有研究表明,改氮肥全部底施为一部分于播种前底施,一部分在拔节期追施有利于促进小麦对肥料氮的吸收,显著提高植株对氮素的吸收量[2-3]。小麦植株对氮素吸收、同化及利用显著影响籽粒产量和蛋白质含量[4]。研究发现,小麦籽粒中的氮素 13%～31%来自开花后吸收同化的氮素,69%～87%来自开花前营养器官贮存氮素的再分配[5],因此,开花后氮素的吸收同化和营养器官氮素向籽粒中的转移,对籽粒蛋白质的积累和产量的形成有重要作用[6]。

黄淮冬麦区是我国小麦主产区之一,该区在小麦开花后常遭遇阴雨寡照等不良气候条件。近 50 年,黄河中下游地区太阳总辐射量和日照时数呈下降趋势,这种下降趋势主要发生在夏季和冬季,且下降趋势仍在继续[7-8]。光照强度的变化严重影响作物对光能和氮素的利用[9-10]。任万军等[11]研究指出,弱光导致植株对氮素吸收强度及积累量减少,且改变氮素在各器官中的分配比例。Wang 等[12]发现,小麦花前和花后各 22 d 遮阴处理均能降低植株干物质积累和运转能力,导致产量下降。开花至成熟阶段是小麦籽粒产量形成的重要时期[13],较高的籽粒产量来源于较高的氮素利用效率和氮素再分配效率[14],而有关光照条件对小麦灌浆期前后氮素积累、分配和转运的研究,目前鲜见报道。为探讨灌浆期不同遮光条件下,不同穗型冬小麦对土壤氮素、基施氮素和追施氮素吸收分配与利用的差异,本试验选用大穗型和多穗型小麦品种,利用^{15}N 同位素示踪技术,在分期施氮条件下研究遮光对开花前后小麦植株氮素吸收特性和营养器官贮存的氮素向籽粒转移规律的影响,旨在为黄淮麦区小麦生产中合理施氮及品种选用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2010～2011 年小麦生长季在山东农业大学泰安试验农场(36° 9′N、117° 9′E)进行,该地区属暖温带大陆性半湿润季风气候区。试验地前茬作物为玉米,全部秸秆还田。0—20 cm 土层土壤有机质含量 13.5 g/kg、全氮 0.89 g/kg、碱解氮 77.8 mg/kg、速效磷 26.6 mg/kg、速效钾 75.2 mg/kg。2011 年 5 月 1 日到小麦收获期间的部分气象数据见图 1。

供试品种为大穗型冬小麦山农 8355(SN8355)和多穗型冬小麦济麦 22(JM22),在各个小区的 4 个角分别埋入竹竿作为立柱,搭建竹架,竹架顶端距小麦冠层 1.5 m。试验为裂区设计,品种为主区,遮光为副区,设 4 个光遮处理,分别为:不遮光(T0);开花后 1～10 d 遮光(T1);开花后 11～20 d 遮光(T2)和开花后 21～30 d 遮光(T3)。3 个时期的遮光处理分别将遮光率为 80%的黑色遮阳网盖于竹架上遮光。每处理 3 次重复,小区面积为 3 m×5 m。各小区均施 P_2O_5 和 K_2O 105 kg/hm^2,N 120 kg/hm^2,磷、钾肥全部底施,氮肥 1/2 做底肥,1/2 在拔节期开沟追施。小麦于 2010 年 10 月 12 日播种,山农 8355 基本苗 270 plant/m^2,济麦 22 基本苗 180 plant/m^2,行距 25 cm,于 2011 年 6 月 14 日收获。小麦生育期间浇越冬水、拔节水和灌浆水,并及时除草、灭虫,小麦植株生长状况良好。^{15}N 微区设在大田试验的各小区内,分别设^{15}N 尿素做底肥 + 普通尿素做追肥、普通尿素做底肥 + ^{15}N 尿素做追肥。微区的遮光、总施肥量、浇水、播种期和基本苗与试验小区一致。每个小区的微区处理重复 2 次,一个用于开花期取样,另一个用于成熟期取样。微区用长×宽×高为 45 cm×20 cm×55 cm 的镀锌铁板做成铁框,于各小区施肥前砸于地下,框体高出地面 5 cm,防止框体内外肥料互混。微区外氮肥采用普通

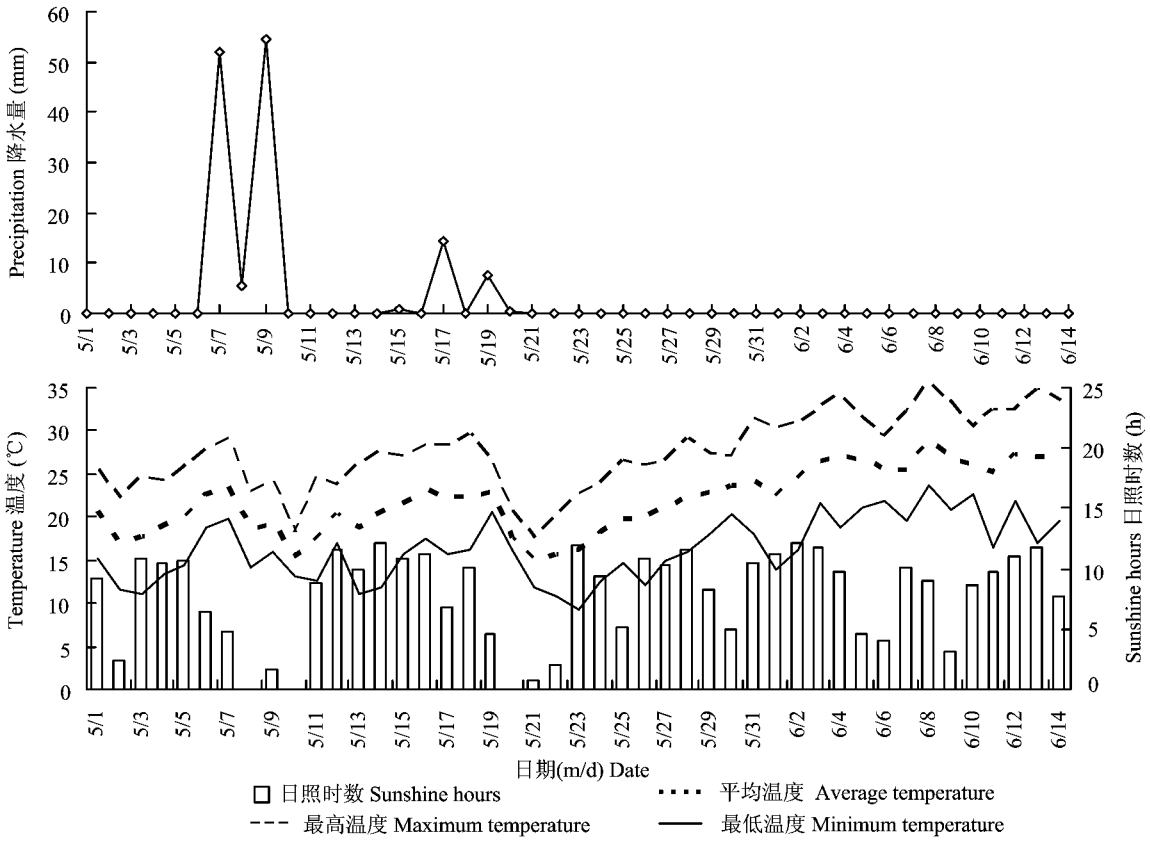

图 1　小麦开花前一周至成熟期的降水量、温度和日照时间

Fig. 1　Precipitation, mean daily temperature and sunshine duration from a week before the anthesis to the maturity of wheat

尿素,微区内氮肥按设计要求实施。^{15}N 尿素(上海化工研究院生产)的丰度为 10.18%(底施尿素丰度)和 10.13%(追施尿素丰度)。每个微区底施和追施尿素均为 2.34 g,磷、钾肥的用量与所在小区的用量一致。

1.2　测定项目与方法

植株含氮量及^{15}N 丰度测定：开花期按穗、旗叶、茎杆 + 叶鞘和其它叶分样；成熟期按籽粒、穗轴 + 颖壳、旗叶、茎杆 + 叶鞘和其它叶分样。每次取样包含微区中的所有植株,在烘箱中于 80℃烘至恒重,粉碎后备用。各器官含氮量用半微量凯氏定氮法测定；^{15}N 丰度用 Iso prime 100 型稳定性同位素质谱仪测定。

各小区收割后脱粒晒干,称重计产量,籽粒含水量为 12.5%。

氮素相关指标的计算方法：

植株积累的氮素来自底施或追施氮的比例(%) = [(器官中^{15}N 丰度 − 0.3663) × 100]/(肥料中^{15}N 丰度 − 0.3663)[15]；

植株积累的氮素来自肥料氮的比例(%) = 来自底施氮的比例 + 来自追施氮的比例[15]；

植株积累的氮素来自肥料氮(底施氮或追施氮)的量 = 植株积累的总氮量 × 植株积累的氮来源于肥料氮(底施氮或追施氮)的比例[15]；

植株来自土壤的氮量 = 植株氮素积累量 − 植株积累的氮素来自(底 + 追)肥氮的量[16]；

肥料氮利用率 = 植株积累的氮素来自肥料氮的量/总施氮量 × 100%[16]；

各器官的氮素分配比例 = 各器官的氮素积累量/单茎总氮素积累量 × 100%[17]；

营养器官氮素转移量 = 开花期营养器官氮素积累量 − 成熟期营养器官氮素积累量[18]；

营养器官氮素贡献率 = 营养器官氮素转移量/成熟期籽粒氮素积累量 × 100%[18]；

氮素利用效率(kg/kg) = 籽粒产量/植株氮素积累量[19]；

氮肥偏生产力(kg/kg) = 籽粒产量/总施氮量[17]。

采用 Microsoft Excel 2007 和 DPS 7.05 软件进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 遮光对小麦植株中不同来源氮素积累的影响

开花期小麦地上部植株积累的氮素 68.0%～71.3%来自土壤氮,28.7%～32.0%来自肥料氮,其中平均 13.1%来自底施氮,17.3%来自追施氮(表1);成熟期积累的氮素 66.5%～77.7%来自土壤氮,22.3%～33.6%来自肥料氮,其中平均 12.5%来自底施氮,15.4%来自追施氮(表2)。说明小麦植株吸收的氮素大部分来自土壤氮,对肥料氮中追施氮的吸收量大于底施氮。

成熟期两品种的氮素总积累量和不同来源氮素的吸收量均表现为 T0 > T3 > T2 > T1(表2),说明灌浆期不同阶段遮光均不利于植株对氮素的吸收和积累,其中灌浆前期遮光对其影响最大,后期遮光影响最小。两品种相比较,开花期和成熟期小麦氮素总积累量均表现为山农 8355 > 济麦 22,而在氮素来源方面两品种表现不一致,开花期来自肥料氮的量表现为济麦 22 > 山农 8355,说明花前济麦 22 对肥料氮的吸收能力高于山农 8355。

2.2 遮光对不同来源氮素在小麦各器官中分配的影响

2.2.1 开花期不同来源氮素在各器官中的分配 开花期肥料氮和土壤氮在各器官的分配量和分配比例均表现为茎+叶鞘 > 颖壳+穗轴 > 其它叶 > 旗叶,而叶片中积累的总氮量 > 颖壳 +穗轴(表3),表明

表1 小麦开花期不同来源氮素的积累量及其比例

Table 1 Nitrogen accumulation amount and its proportion from different sources at the anthesis of wheat

品种 Cultivar	氮素总积累量 TNAA (mg/stem)	来自肥料氮 NDFF						来自土壤氮 NDFS	
		来自底施氮 NDFBF		来自追施氮 NDFTF		合计 Total			
		(mg/stem)	(%)	(mg/stem)	(%)	(mg/stem)	(%)	(mg/stem)	(%)
山农 8355 SN8355	44.34	5.23	11.8	7.49	16.9	12.73	28.7	31.61	71.3
济麦 22 JM22	26.20	3.78	14.4	4.61	17.6	8.39	32.0	17.81	68.0

注(Note): TNAA—Total nitrogen accumulation amount; NDFF—N derived from fertilizer; NDFBF—N from basal dressing fertilizer; NDFTF—N derived from topdressing fertilizer; NDFS—N derived from the soil.

表2 小麦成熟期不同来源氮素的积累量及其比例

Table 2 Nitrogen accumulation amount and its proportion from different sources at the maturity of wheat

品种 Cultivar	处理 Treatment	氮素总积累量 TNAA (mg/stem)	来自肥料氮 NDFF						来自土壤氮 NDFS	
			来自底施氮 NDFBF		来自追施氮 NDFTF		合计 Total			
			(mg/stem)	(%)	(mg/stem)	(%)	(mg/stem)	(%)	(mg/stem)	(%)
山农 8355 SN8355	T0	50.63 a	7.37 a	14.6 a	9.62 a	19.0 a	16.98 a	33.6 a	33.64 b	66.5 d
	T1	44.16 d	4.69 d	10.6 d	5.42 d	12.3 d	10.11 d	22.9 d	34.05 a	77.1 a
	T2	45.13 c	5.77 c	12.8 c	6.60 c	14.6 c	12.37 c	27.4 c	32.76 c	72.6 b
	T3	46.67 b	6.35 b	13.6 b	7.57 b	16.2 b	13.92 b	29.8 b	32.75 c	70.2 c
济麦 22 JM22	T0	35.92 a	5.17 a	14.4 a	6.22 a	17.3 a	11.40 a	31.7 a	24.52 a	68.3 d
	T1	28.21 d	2.65 d	9.4 d	3.64 d	12.9 d	6.29 d	22.3 d	21.92 c	77.7 a
	T2	29.55 c	3.29 c	11.1 c	4.18 c	14.1 c	7.47 c	25.3 c	22.08 bc	74.7 b
	T3	31.93 b	4.27 b	13.4 b	5.40 b	16.9 b	9.66 b	30.3 b	22.27 b	69.7 c

注(Note): TNAA—Total nitrogen accumulation amount; NDFF—N derived from fertilizer; NDFBF—N from basal dressing fertilizer; NDFTF—N derived from topdressing fertilizer; NDFS—N derived from the soil. 同品种同列数值后不同小写字母表示差异达到0.05 显著水平 Values followed by different letters within a column in the same cultivar are significantly different at the 0.05 probability level.

表 3　小麦开花期不同来源氮素在各器官中的积累与分配

Table 3　Accumulation and distribution of nitrogen in organs from different sources at the anthesis of wheat

氮素来源 N source	品种 Cultivar	氮素积累量(mg/stem) Nitrogen accumulation amount					分配比例(%) Distribution proportion			
		颖壳＋穗轴 SH	茎＋叶鞘 SS	旗叶 FL	其它叶 AL	合计 Total	颖壳＋穗轴 SH	茎＋叶鞘 SS	旗叶 FL	其它叶 AL
来自底施氮 NDFBF	山农 8355 SN8355	1.22	2.49	0.66	0.94	5.23	2.8	5.6	1.5	2.1
	济麦 22 JM22	0.99	1.64	0.44	0.77	3.78	3.8	6.3	1.7	2.9
来自追施氮 NDFTF	山农 8355 SN8355	1.82	3.67	1.04	1.10	7.49	4.1	8.3	2.4	2.5
	济麦 22 JM22	1.29	2.04	0.61	0.70	4.61	4.9	7.8	2.3	2.7
来自土壤氮 NDFS	山农 8355 SN8355	6.87	14.09	4.10	6.34	31.61	15.5	31.8	9.3	14.3
	济麦 22 JM22	4.29	7.23	2.15	4.07	17.81	16.4	27.6	8.2	15.5

注(Note)：NDFBF—N from basal dressing fertilizer；NDFTF—N derived from topdressing fertilizer；NDFS—N derived from the soil. SH—Spike axis + Husk；SS—Stem + Sheath；FL—Flag leaf；AL—Other leaves.

开花期氮素主要集中在茎＋叶鞘、叶片等营养器官中。从氮素的来源看，各器官均表现为土壤氮的分配量和分配比例大于肥料氮；肥料氮中追施氮的分配量和分配比例大于底施氮。说明土壤氮对各器官氮素积累的贡献大于肥料氮，拔节期追施氮肥对各器官氮素积累的贡献大于底施氮肥。两品种相比较，山农 8355 开花期各营养器官对不同来源氮素的积累量大于济麦 22，而山农 8355 中来源于肥料氮的比例小于济麦 22。

2.2.2 成熟期不同来源氮素在各器官中的分配　成熟期肥料氮和土壤氮在各器官的分配量和分配比例均表现为籽粒＞茎＋叶鞘＞颖壳＋穗轴＞其它叶＞旗叶，且来自土壤氮量和比例显著大于来自肥料氮，来自追施氮的量和比例显著大于来自底施氮(表 4)。

各遮光处理间比较，成熟期不同来源氮素在颖壳＋穗轴和籽粒中分配量和分配比例均表现为 T0＞T3＞T2＞T1，表明灌浆期遮光抑制了氮素在穗部及籽粒中的积累，不利于提高籽粒蛋白质的积累，灌浆前期遮光对其影响最大，中期次之，后期最小；与肥料氮相比较，灌浆期遮光增加了土壤氮在营养器官的分配比例，不利于营养器官中土壤氮素向籽粒的转运(表 4)，成熟期积累的氮素 66.5%～77.7%来自土壤氮，22.3%～33.6%来自肥料氮(表 2)，说明灌浆期遮光主要是通过影响土壤氮素的转运来影响籽粒的含氮量。各处理条件下氮素在两品种各器官中的分配比例表现一致，氮素积累量表现为山农 8355＞济麦 22。

2.3　遮光对小麦花后营养器官中氮素转运的影响

表 5 显示，各个营养器官氮素向籽粒的转移量均表现为茎＋叶鞘＞叶片＞颖壳＋穗轴，叶片中首属旗叶中向籽粒转移的氮素最多。各处理吸收的土壤氮的转移量显著大于肥料氮，肥料氮中追施氮肥转移量大于底施氮。

不同遮光处理比较，营养器官中来自肥料氮的氮素向籽粒的转移总量表现为 T1＞T2＞T3＞T0，济麦 22 各处理间差异显著，山农 8355 T2 和 T3 处理无显著差异，表明灌浆期遮光提高了营养器官中来自肥料氮素对籽粒的贡献，其中灌浆前期遮光对其影响最大，中期次之，后期最小。营养器官中来自土壤氮的氮素向籽粒的转移总量表现为 T0＞T3＞T2＞T1，差异显著，说明氮素的转移量与吸收量有关，吸收多者，转移量亦大，这是土壤氮对籽粒蛋白质积累贡献大的生理基础。两品种相比较，营养器官中氮素对籽粒的贡献率表现为济麦 22＞山农 8355，说明济麦 22 对植株内积累氮素的再利用能力较高。

2.4　遮光对小麦籽粒产量和产量性状及肥料氮利用率的影响

从表 6 可以看出，遮光处理对两小麦品种的每公顷穗数无显著影响，相同处理条件下山农 8355 的每公顷穗数显著小于济麦 22，这与两品种的基因型有关。遮光处理显著降低了小麦的穗粒数，遮光的先后对济麦 22 的穗粒数无影响，而山农 8355 的穗粒数表现为 T0＞T2、T3＞T1。灌浆期不同阶段遮光均导致小麦千粒重的降低，两小麦品种的千粒重均

表4 小麦成熟期不同来源氮素在各器官中的积累与分配

Table 4 Accumulation and distribution of nitrogen in organs from different sources at the maturity of wheat

氮素来源 N source	品种 Cultivar	处理 Treat.	氮素积累量(mg/stem) Nitrogen accumulation amount					分配比例(%) Distribution proportion				
			籽粒 Kernel	颖壳+穗轴 SH	茎+叶鞘 SS	旗叶 FL	其它叶 AL	籽粒 Kernel	颖壳+穗轴 SH	茎+叶鞘 SS	旗叶 FL	其它叶 AL
来自底施氮 NDFBF	山农8355 SN8355	T0	5.71 a	0.60 a	0.75 c	0.14 c	0.17 c	11.3 a	1.2 a	1.5 d	0.2 c	0.3 b
		T1	3.30 d	0.28 d	0.81 a	0.13 d	0.17 c	7.5 d	0.6 c	1.8 a	0.3 b	0.3 b
		T2	4.26 c	0.38 c	0.78 b	0.16 b	0.20 a	9.4 c	0.8 b	1.7 b	0.3 a	0.4 a
		T3	4.85 b	0.40 b	0.75 c	0.16 a	0.18 b	10.3 b	0.9 b	1.6 c	0.3 a	0.3 b
	济麦22 JM22	T0	4.16 a	0.38 a	0.46 a	0.08 a	0.11 b	11.6 a	1.1 a	1.3 b	0.2 b	0.3 b
		T1	2.00 d	0.15 d	0.34 d	0.06 d	0.10 c	7.1 d	0.5 d	1.2 c	0.1 c	0.3 b
		T2	2.53 c	0.21 c	0.38 c	0.07 c	0.12 a	8.6 c	0.7 c	1.3 b	0.2 a	0.4 a
		T3	3.37 b	0.26 b	0.44 b	0.07 b	0.12 a	10.6 b	0.8 b	1.4 a	0.2 a	0.3 b
来自追施氮 NDFTF	山农8355 SN8355	T0	7.45 a	0.78 a	0.98 a	0.18 b	0.22 a	14.7 a	1.5 a	1.9 c	0.4 b	0.4 b
		T1	3.81 d	0.33 d	0.93 b	0.15 c	0.19 b	8.6 d	0.7 d	2.1 a	0.3 c	0.4 b
		T2	4.87 c	0.43 c	0.89 c	0.18 b	0.22 a	10.8 c	0.9 c	2.0 b	0.4 a	0.5 a
		T3	5.79 b	0.48 b	0.89 c	0.19 a	0.21 a	12.3 b	1.0 b	1.9 c	0.4 a	0.4 b
	济麦22 JM22	T0	5.00 a	0.45 a	0.55 a	0.09 a	0.13 c	13.9 a	1.3 a	1.5 d	0.2 c	0.3 c
		T1	2.75 d	0.20 d	0.47 c	0.08 c	0.14 b	9.8 d	0.7 d	1.7 b	0.3 b	0.4 b
		T2	3.20 c	0.26 c	0.48 b	0.09 b	0.15 a	10.8 c	0.9 c	1.6 c	0.2 a	0.5 a
		T3	4.27 b	0.33 b	0.55 a	0.09 a	0.15 a	13.4 b	1.1 b	1.7 a	0.2 a	0.4 b
来自土壤氮 NDFS	山农8355 SN8355	T0	26.08 a	2.72 c	3.44 d	0.64 d	0.76 d	51.5 c	5.4 a	6.8 d	1.3 d	1.5 d
		T1	24.00 c	2.05 a	5.86 a	0.95 a	1.22 a	54.3 a	4.7 b	13.3 a	2.2 a	2.8 a
		T2	24.19 c	2.14 b	4.43 b	0.89 b	1.11 b	53.6 ab	4.7 b	9.8 b	2.0 b	2.5 b
		T3	25.04 b	2.09 b	3.86 c	0.84 c	0.93 c	53.3 b	4.4 c	8.2 c	1.8 c	2.0 c
	济麦22 JM22	T0	19.70 a	1.78 a	2.17 d	0.36 d	0.51 d	54.9 c	5.0 a	6.0 d	1.0 d	1.4 d
		T1	16.57 d	1.23 c	2.82 a	0.48 a	0.82 a	58.8 a	4.4 b	10.0 a	1.7 a	2.9 a
		T2	16.94 c	1.38 b	2.54 b	0.45 b	0.77 b	57.3 b	4.7 a	8.6 b	1.5 b	2.6 b
		T3	17.62 b	1.38 b	2.28 c	0.38 c	0.61 c	55.2 c	4.32 b	7.1 c	1.2 c	1.9 c

注(Note): NDFBF—N from basal dressing fertilizer; NDFTF—N derived from topdressing fertilizer; NDFS—N derived from the soil. SH—Spike axis + Husk; SS—Stem + Sheath; FL—Flag leaf; AL—Other leaves. 同品种同列数值后不同小写字母表示差异达到0.05显著水平 Values followed by different letters within a column in the same cultivar are significantly different at the 0.05 probability level.

表现为T0 > T3 > T2 > T1规律。籽粒产量的表现规律与千粒重一致。

各处理籽粒产量、肥料氮吸收量、氮肥利用率和肥料偏生产力均表现为T0 > T3 > T2 > T1,且差异显著,说明灌浆期遮光均导致籽粒产量降低,亦不利于小麦对氮肥的利用,其中灌浆前期遮光对其影响最大,灌浆中期遮光的次之,灌浆后期的最低。两品种相比较,发现相同处理条件下济麦22籽粒产量、肥料氮吸收量、氮肥利用率和肥料偏生产力均高于山农8355,说明与大穗品种山农8355相比,多穗品种济麦22的产量潜力和对氮肥的利用能力较强。

表 5　小麦开花后营养器官积累的氮素向籽粒的转移

Table 5　Nitrogen translocation amount from vegetative organs to grain after the anthesis of wheat

氮素来源 N source	品种 Cultivar	处理 Treat.	转移量(mg/stem) Nitrogen translocation amount					贡献率(%) Contribution proportion				
			颖壳+穗轴 SH	茎+叶鞘 SS	旗叶 FL	其它叶 AL	合计 Total	颖壳+穗轴 SH	茎+叶鞘 SS	旗叶 FL	其它叶 AL	合计 Total
来自底施氮 NDFBF	山农 8355 SN8355	T0	0.62 d	1.74 a	0.52 b	0.77 a	3.65 c	1.6 d	4.4 d	1.3 d	2.0 d	9.3 d
		T1	0.94 a	1.68 c	0.53 a	0.77 a	3.92 a	3.0 a	5.4 a	1.7 a	2.5 a	12.6 a
		T2	0.84 b	1.71 b	0.50 c	0.74 c	3.80 b	2.5 b	5.1 b	1.5 b	2.2 b	11.4 b
		T3	0.82 c	1.74 a	0.49 d	0.76 b	3.82 b	2.3 c	4.9 c	1.4 c	2.1 c	10.7 c
	济麦 22 JM22	T0	0.61 d	1.38 d	0.36 d	0.46 b	2.82 d	2.1 d	4.8 d	1.3 d	1.6 d	9.8 d
		T1	0.84 a	1.50 a	0.38 a	0.47 a	3.19 a	3.9 a	7.0 a	1.8 a	2.2 a	15.0 a
		T2	0.78 b	1.46 b	0.37 b	0.45 c	3.07 b	3.5 b	6.5 b	1.6 b	2.0 b	13.6 b
		T3	0.73 c	1.40 c	0.36 c	0.45 c	2.95 c	2.9 c	5.6 c	1.5 c	1.8 c	11.7 c
来自追施氮 NDFTF	山农 8355 SN8355	T0	1.04 d	2.69 c	0.86 b	0.88 b	5.47 c	2.7 d	6.8 d	2.2 d	2.3 d	13.9 d
		T1	1.49 a	2.74 b	0.89 a	0.91 a	6.03 a	4.8 a	8.8 a	2.9 a	2.9 a	19.4 a
		T2	1.39 b	2.78 a	0.86 b	0.88 b	5.90 b	4.2 b	8.3 b	2.6 b	2.6 b	17.7 b
		T3	1.33 c	2.78 a	0.84 c	0.89 b	5.85 b	3.8 c	7.8 c	2.4 c	2.5 c	16.4 c
	济麦 22 JM22	T0	0.84 d	1.49 c	0.52 c	0.57 a	3.42 d	2.9 d	5.2 d	1.8 d	2.0 d	11.8 d
		T1	1.09 a	1.57 a	0.53 a	0.56 b	3.75 a	5.1 a	7.4 a	2.5 a	2.7 a	17.6 a
		T2	1.03 b	1.56 b	0.52 b	0.55 c	3.67 b	4.5 b	6.9 b	2.3 b	2.4 b	16.2 b
		T3	0.96 c	1.49 c	0.51 c	0.55 c	3.51 c	3.8 c	5.9 c	2.1 c	2.2 c	13.9 c
来自土壤氮 NDFS	山农 8355 SN8355	T0	4.15 b	10.65 a	3.46 a	5.58 a	23.84 a	10.6 d	27.1 b	8.8 d	14.2 d	60.7 c
		T1	4.82 a	8.23 d	3.15 d	5.12 d	21.32 d	15.5 a	26.5 c	10.1 a	16.5 a	68.6 a
		T2	4.73 a	9.66 c	3.21 c	5.23 c	22.83 c	14.2 b	29.0 a	9.7 b	15.7 b	68.5 a
		T3	4.78 a	10.23 b	3.26 b	5.41 b	23.69 b	13.4 c	28.7 a	9.1 c	15.2 c	66.4 b
	济麦 22 JM22	T0	2.51 c	5.06 a	1.79 a	3.56 a	12.92 b	8.7 d	17.5 c	6.2 d	12.4 d	44.8 d
		T1	3.06 a	4.41 d	1.67 d	3.25 d	12.39 d	14.4 a	20.7 a	7.9 a	15.3 a	58.1 a
		T2	2.91 b	4.69 c	1.70 c	3.30 c	12.60 c	12.8 b	20.7 a	7.5 b	14.6 b	55.6 b
		T3	2.91 b	4.95 b	1.77 b	3.49 b	13.09 a	11.5 c	19.6 b	7.0 c	13.7 c	51.8 c

注(Note):NDFBF—N from basal dressing fertilizer; NDFTF—N derived from topdressing fertilizer; NDFS—N derived from the soil. SH—Spike axis + Husk; SS—Stem + Sheath; FL—Flag leaf; AL—Other leaves. 同品种同列数值后不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平 Values followed by different letters within a column in the same cultivar are significantly different at the 0.05 probability level.

2.5　籽粒产量、氮素总积累量、营养器官贡献率和氮素利用效率的方差分析

品种间籽粒产量、氮素总积累量、营养器官贡献率和氮素利用效率差异达极显著水平(表 7);遮光处理对小麦籽粒产量、氮素总积累量、营养器官贡献率和氮素利用效率亦达到极显著水平;遮光与品种的互作对籽粒产量、氮素总积累量和氮素利用效率的影响达极显著水平,遮光与品种互作对营养器官的贡献率无显著影响。表明遮光对籽粒产量、氮素总积累量和氮素利用效率的影响存在品种差异,对营养器官的贡献率的影响不存在品种差异。

表6 不同遮光处理对小麦籽粒产量和肥料氮利用率的影响

Table 6 Effects of different shading treatments on grain yield and fertilizer nitrogen use efficiency of wheat

品种 Cultivar	处理 Treat.	籽粒产量 Grain yield (kg/hm²)	穗数 Spike (×10⁴/hm²)	穗粒数(No.) Kernels per spike	千粒重 TKW (g)	肥料氮吸收量 UFN (kg/hm²)	肥料氮利用率 EFU (%)	肥料偏生产力 PPFN (kg/kg)
山农8355 SN8355	T0	5961.3 a	371.79 a	41.87 a	52.79 a	67.9 a	28.3 a	24.8 a
	T1	4328.5 d	369.12 a	39.63 c	45.53 d	40.4 d	16.9 d	18.0 d
	T2	4969.3 c	372.24 a	40.25 b	48.26 c	49.5 c	20.6 c	20.7 c
	T3	5400.4 b	393.14 a	40.75 b	50.81 b	55.7 b	23.2 b	25.5 b
济麦22 JM22	T0	7160.0 a	679.50 a	34.87 a	42.63 a	76.0 a	31.7 a	29.8 a
	T1	5198.3 d	682.61 a	32.76 b	37.32 d	42.0 d	17.5 d	21.7 d
	T2	5811.4 c	679.06 a	32.69 b	38.21 c	49.8 c	20.8 c	24.2 c
	T3	6493.7 b	669.27 a	33.92 ab	40.49 b	64.4 b	26.9 b	27.1 b

注(Note): TKW—Thousand kernel of weight; UFN—Uptake from fertilizer N; EFU—Fertilizer N use efficiency; PPFN—Partial factor productivity from fertilizer N. 同品种同列数值后不同小写字母表示差异达到0.05 显著水平 Values followed by different letters within acolumn in the same cultivar are significantly different at the 0.05 probability level.

表7 不同小麦品种氮素利用相关指标的方差分析

Table 7 Variance analysis of composition of nitrogen utilization in different wheat cultivars

变因 Factor	*F* 值 *F* – value			
	籽粒产量 Grain yield	氮素总积累量 Total nitrogen accum. amount	贡献率 Contribution proportion	氮素利用效率 Nitrogen use efficiency
品种 Cultivar (C)	116.95**	30413.08**	20.15**	16.46**
处理 Treatment (T)	61.22**	1266.14**	8.54**	9.83**
品种×处理 C×T	8.52**	12.40**	0.35	13.20**

注(Note): *, ** 分别表示在0.05 和0.01 水平显著 Indicate significances at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论

研究表明,土壤耕作层存在大量的矿物氮[20],而小麦一生吸收的氮素1/3来自肥料氮,2/3来自土壤氮[21]。本试验利用^{15}N同位素示踪法研究得出,开花期小麦地上部植株积累的氮素68.0%～71.39%来自土壤氮,28.7%～32.0%来自肥料氮;成熟期积累的氮素66.5%～77.7%来自土壤氮,22.3%～33.6%来自肥料氮,与前人研究结果基本一致,小麦一生中吸收的土壤氮多,肥料氮少,说明培肥地力是获得高产的基础[22]。本研究发现,小麦植株吸收的底施氮和追施氮的比例不同,开花期地上部积累的氮素平均13.1%来自底施氮,17.3%来自追施氮;成熟期的为12.5%来自底施氮,15.4%来自追施氮,研究结果表明,在本试验条件下,小麦对追施氮的利用率高于底施氮肥。因此,在灌溉麦田的高产栽培过程中,应适当减小氮肥的基追比,以确保获得较高的氮肥利用率。

叶片的衰老以营养器官蛋白质的降解和氮素向籽粒中的转运为特征[23]。研究发现,遮光能延缓叶片的衰老[24],并改变氮素在各器官中的分配比例,使分配到叶片和茎鞘的氮素增加,分配到穗部的氮素减少[11]。本研究结果表明,灌浆期阶段性遮光改变了植株营养器官的衰老进程,对植株氮素积累和营养器官氮素转运的调控效应存在差异。灌浆前期、中期和后期遮光均显著抑制了氮素在穗部及籽粒中的积累,不利于提高籽粒蛋白质的积累,其中灌浆前期遮光对其影响最大,中期次之,后期最小。分析认为,小麦开花后其光合能力开始衰退,碳水化合物的积累速度逐渐减慢,不同时期遮光对其的影响以前期最大,中期次之,后期最小。遮光处理光照减弱,光合作用受抑,碳水化合物供应减少,进而导致

硝酸还原酶活性降低[25-27]。因此出现灌浆期前期遮光对小麦氮素积累的影响最大，中期次之，后期最小的结果。灌浆期是小麦氮素吸收和分配的关键时期，开花后营养器官氮素的转移对籽粒氮素的积累有较大贡献[17]。本研究中不同遮光处理相比较，营养器官中来自肥料氮的氮素向籽粒的转移总量表现为 T1 > T2 > T3 > T0，其中多穗型济麦 22 各处理间差异显著，大穗型山农 8355 除 T2、T3 外各处理间差异显著；营养器官中来自土壤氮的氮素向籽粒的转移总量表现为 T0 > T3 > T2 > T1。说明遮光降低了土壤氮素向籽粒的转移，但是提高了肥料氮素向籽粒的转移。成熟期籽粒氮素积累量不同处理间表现趋势同土壤氮的氮素向籽粒的转移总量一致，亦表现为 T0 > T3 > T2 > T1，说明土壤氮素的吸收、利用对小麦籽粒氮素的积累具有重要影响，土壤氮素在小麦高产栽培中起更重要的作用。

前人研究指出，小麦灌浆期叶片光合产物对籽粒产量的贡献率达 80% 以上[28]，灌浆期遮光导致叶片光合速率下降，籽粒灌浆速率降低，致使小麦产量降低[29-30]。本研究发现，各遮光处理籽粒产量与千粒重均表现为 T0 > T3 > T2 > T1，通过对表 6 中的产量性状数据分析发现，灌浆期遮光导致产量的下降主要是通过影响千粒重来实现的。灌浆前期遮光一方面导致败育籽粒增多，另一个方面影响胚乳细胞分化，籽粒库容减小[31]，粒重降低，对产量影响最大；灌浆中期是籽粒快速增长期，该阶段遮光对籽粒充实不利；灌浆后期是籽粒缓慢增重期，该阶段遮光对产量影响最小[32]。对比两品种发现，两穗型小麦籽粒产量、千粒重和穗粒数对花后不同阶段遮光的变化规律表现基本一致，说明花后遮光不利于小麦生产；相同处理条件下，两穗型小麦籽粒产量差异显著，这主要与两品种的有效成穗数不同有关。同时，方差分析也表明遮光对籽粒产量、氮素总积累量和氮素利用效率的影响存在品种差异，因此在该地区小麦生产中应根据大田条件选用适当品种，以达到高产高效。

参 考 文 献：

[1] 曹仁林，贾晓葵. 我国集约化农业中氮污染问题及防治对策[J]. 土壤肥料，2001，(3)：3-6.
Cao R L, Jia X K. The problems and control countermeasures of nitrogen pollution in agriculture of China[J]. Soils Fert., 2001, (3): 3-6.

[2] 石玉，于振文，王东，等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响[J]. 作物学报，2006，32(12)：1860-1866.
Shi Y, Yu Z W, Wang D *et al*. Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake, translocation of nitrogen and yield in wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(12): 1860-1866.

[3] Demotes M S, Jeuffroy M H. Effects of nitrogen and radiation on dry matter nitrogen accumulation in the spike of winter wheat[J]. Field Crops Res., 2004, 87(2-3): 221-233.

[4] 王德梅，于振文，张永丽，等. 不同灌水处理条件下不同小麦品种氮素积累、分配与转移的差异[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(5)：1041-1048.
Wang D M, Yu Z W, Zhang Y L *et al*. Changes in nitrogen accumulation, distribution, translocation and nitrogen use efficiency in different wheat cultivars under different irrigation conditions[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(5): 1041-1048.

[5] 同延安，赵营，赵护兵，樊红柱. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(1)：64-69.
Tong Y A, Zhao Y, Zhao H B, Fan H Z. Effect of N rates on N uptake, transformation and the yield of winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(1): 64-69.

[6] 杜金哲，李文雄，胡尚连，刘锦红. 春小麦不同品质类型氮的吸收、转化利用及与子粒产量和蛋白质含量的关系[J]. 作物学报，2001，27(2)：253-260.
Du J Z, Li W X, Hu S L, Liu J H. Nitrogen assimilation, transfer and utilization in relation to grain protein content and yield of spring wheat genotypes differing in quality[J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(2): 253-260.

[7] 徐宗学，赵芳芳. 黄河流域日照时数变化趋势分析[J]. 资源科学，2005，27(5)：153-159.
Xu Z X, Zhao F F. Variation of sunlight radiation duration in the Yellow River Basin[J]. Resour. Sci., 2005, 27(5): 153-159.

[8] 杨羡敏，曾燕，邱新法，姜爱军. 1960-2000 年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究[J]. 应用气象学报，2005，16(2)：243-248.
Yang X M, Zeng Y, Qiu X F, Jiang A J. The climatic change of global solar radiation over the Yellow River Basin during 1960-2000[J]. J. Appl. Meteor. Sci., 2005, 16(2): 243-248.

[9] Bell G, Danneberge T, McMahon M. Spectral irradiance available for turfgrass growth in sun and shade[J]. Crop Sci., 2000, 40: 189-195.

[10] Jiang H, Wang X H, Deng Q Y, Yuan L P, Xu D Q. Comparison of some photosynthetic characters between two hybrid rice combinations differing in yield potential[J]. Photosynthetica, 2002, 40: 133-137.

[11] 任万军，杨文钰，张国珍，等. 弱光对杂交稻氮素积累、分配与子粒蛋白质含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2003，9(3)：288-293.
Ren W J, Yang W Y, Zhang G Z *et al*. Effect of low-light stress on nitrogen accumulation, distribution and grains protein content of indicahybrid[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(3): 288-293.

[12] Wang Z, Yin Y, He M *et al*. Allocation of photosynthates and grain growth of two wheat cultivars with different potential grain growth in response to pre- and post-anthesis shading[J]. Crop

Sci., 2003, 189: 280-285.

[13] Cassman K G, Bryant D C, Fulton A E, Jackson L F. Nitrogen supply effects on partitioning of dry matter and nitrogen to grain of irrigated wheat[J]. Crop Sci., 1992, 32(5): 1251-1258.

[14] Wang H, McCaig T N, DePauw R M *et al*. Physiological characteristics of recent Canada western red spring wheat cultivars: components of grain nitrogen yield[J]. Can. J. Plant Sci., 2003, 83(4): 699-707.

[15] Choudhury T M A, Khanif Y M. Evaluation of effects of nitrogen and magnesium fertilization on rice yield and fertilizer nitrogen efficiency using ^{15}N tracer technique[J]. J. Plant Nutr., 2001, 24(6): 855-871.

[16] Zanetti S, Hartwig U A, Kessel C V *et al*. Does nitrogen nutrition restrict the CO_2 response of fertile grassland lacking legumes[J]. Oecologia, 1997, 112: 17-25.

[17] 赵俊晔, 于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 484-490.
Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition[J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(4): 484-490.

[18] 吉春容, 李世清, 伍维模, 等. 半湿润农田生态条件下施氮对不同冬小麦品种氮素转移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 569-577.
Ji C R, Li S Q, Wu W M *et al*. Effect of N fertilization on N translocation of different winter wheat cultivars during grain filling period in sub-humid farmland ecologic system[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(5): 569-577.

[19] 周建斌, 杨绒, 郑险峰, 等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素积累、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 143-149.
Zhou J B, Yang R, Zheng X F *et al*. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(2): 143-149.

[20] Blankenau K, Olfs H. Effect of different crop densities of winter wheat on recovery of nitrogen in crop and soil within the growth period[J]. J. Agron. Crop Sci., 2001, 186: 151-156.

[21] 王月福, 姜东, 于振文, 曹卫星. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5): 513-520.
Wang Y F, Jiang D, Yu Z W, Cao W X. Effects of nitrogen rates on grain yield and protein content of wheat and its physiological basis[J]. Sci. Agric. Sin., 2003, 36(5): 513-520.

[22] 王小燕, 于振文. 不同施氮量条件下灌溉量对小麦氮素吸收转运和分配的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3015-3024.
Wang X Y, Yu Z W. Effect of irrigation rate on absorption and translocation of nitrogen under different nitrogen fertilizer rate in wheat[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(10): 3015-3024.

[23] Parrott D, Yang L, Shama L, Fischer A M. Senescence is accelerated, and several proteases are induced by carbon "feast" conditions in barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves[J]. Planta, 2005, 222: 989-1000.

[24] 黄俊, 郭世荣, 蒋芳林, 等. 遮荫处理及恢复光照对白菜生长及活性氧代谢的影响[J]. 园艺学报, 2008, 35(5): 753-756.
Huang J, Guo S R, Jiang F L *et al*. Effects of Shading treatment and regular light recovery on growth and reactive oxygen metabolism of Pak-choi[J]. Acta Hortic. Sin., 2008, 35(5): 753-756.

[25] 戴廷波, 曹卫星, 孙传范, 等. 增铵营养对小麦光合作用及硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1529-1532.
Dai T B, Cao W X, Sun C F *et al*. Effect of enhanced ammonium nutrition on photosynthesis and nitrate reductase and glutamine synthetase activities of winter wheat[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(9): 1529-1532.

[26] Larios B, Aguera E, de la Haba P *et al*. A short term exposure of cucumber plants to rising atmospheric CO_2 increases leaf carbohydrate content and enhances nitrate reductase expression and activity[J]. Planta, 2001, 212: 305-312.

[27] Lejay L, Quillere I, Roux Y *et al*. Abolition of posttranscriptional regulation of nitrate reductase partially prevents the decrease in leaf NO_3^- reduction when photosynthesis is inhibited by CO_2 deprivation, but not in darkness[J]. Plant Physiol., 1997, 115: 623-630.

[28] 蔡瑞国, 张敏, 尹燕枰, 等. 小麦灌浆过程中旗叶光合及抗氧化代谢与氮素营养关系研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 53-62.
Cai R G, Zhang M, Yin Y P *et al*. Photosynthetic characteristics and antioxidative metabolism of flag leaves in responses to nitrogen application in wheat during grain filling[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(1): 53-62.

[29] 刘霞, 尹燕枰, 姜春明, 等. 花后不同时期弱光和高温胁迫对小麦旗叶荧光特性及子粒灌浆进程的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2117-2121.
Liu X, Yin Y P, Jiang C M *et al*. Effects of weak light and high temperature stress after anthesis on flag leaf chlorophyll fluorescence and grain fill of wheat[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(11): 2117-2121.

[30] 刘霞, 穆春华, 尹燕枰, 等. 花后高温、弱光及其双重胁迫对小麦子粒内源激素含量与增重进程的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(4): 677-681.
Liu X, Mu C H, Yin Y P *et al*. Effects of high temperature and shading stress after anthesis on endogenous hormone contents and filling process in wheat grain[J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(4): 677-681.

[31] 王蔚华, 郭文善, 方明奎, 等. 小麦子粒胚乳细胞增殖及物质充实动态[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 779-784.
Wang W H, Guo W S, Fang M K *et al*. Endosperm cell proliferating and grain filling dynamics in wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2003, 29(5): 779-784.

[32] 王东, 于振文. 不同施氮量下子粒灌浆不同阶段遮光对小麦氮素积累和转移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 615-622.
Wang D, Yu Z W. Effects of shading at different filling stages on nitrogen accumulation and translocation in wheat at different nitrogen rates[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(4): 615-622.