

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2016.01853

不同氮素处理对中麦 175 和京冬 17 产量相关性状和氮素利用效率的影响

李法计¹ 徐学欣² 肖永贵¹ 何中虎^{1,3} 王志敏^{2,*}

¹ 中国农业科学院作物科学研究所 / 国家小麦改良中心, 北京 100081; ² 中国农业大学农学院, 北京 100193; ³ CIMMYT 中国办事处, 北京 100081

摘要: 本研究旨在了解我国黄淮和北部冬麦区不同施氮量和施氮模式对氮高效吸收和利用的影响, 以及中麦175和京冬17产量对不同施氮处理的响应。2013—2014和2014—2015连续两年在河北吴桥和北京顺义两地种植两品种, 观测不同施氮量和基追比处理下, 冬小麦的群体特性、产量相关性状, 以及氮素吸收效率(NUpE)和氮素利用效率(NUE)。在吴桥点设0、60+0、120+0、120+60、120+120、120+180 kg hm⁻² (基肥+拔节肥) 6个处理, 在顺义点仅设前5个处理。在总施氮量0~240 kg hm⁻² (吴桥)和0~180 kg hm⁻² (顺义)范围内, 随施氮量增加, 归一化植被指数(NDVI)和气冠温差(CTD)提高, 群体总粒数和成熟期生物量增加, 进而产量提高; 但继续增加施氮量会导致粒重、开花前干物质向籽粒转运量、转运率、对籽粒贡献率、收获指数、氮肥偏生产力、氮素吸收和利用效率降低。在不同施氮水平下, 中麦175的产量和稳定性均优于京冬17, 表现出穗数多、穗粒重稳定性好、群体活力持久、生物量和收获指数高、花前干物质积累量高和花后干物质转运能力强、氮素吸收效率高, 这可能是其高产高效的重要基础。考虑到产量回报和经济效益, 推荐中麦175和京冬17在黄淮麦区(北片)施氮量为180~240 kg hm⁻², 在北部冬麦区施氮量为120~180 kg hm⁻²。灌浆中后期, NDVI 和 CTD 与穗数、产量和生物量相关性高, 可作为快速评价品种氮肥敏感性的指标。

关键词: 冬小麦; 氮素利用效率; 干物质; 高产; 稳产

Effect of Nitrogen on Yield Related Traits and Nitrogen Utilization Efficiency in Zhongmai 175 and Jingdong 17

LI Fa-Ji¹, XU Xue-Xin², XIAO Yong-Gui¹, HE Zhong-Hu^{1,3}, and WANG Zhi-Min^{2,*}

¹ Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS) / National Wheat Improvement Center, Beijing 100081, China; ² College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ³ CIMMYT-China Office, c/o CAAS, Beijing 100081, China

Abstract: The objective of this study was to understand the effects of different nitrogen (N) application amounts and split ratios on high efficiency of N uptake and utilization, as well as the response to different N treatments of Zhongmai 175 and Jingdong 17 planted in Wuqiao, Hebei, and Shunyi, Beijing in 2013–2014 and 2014–2015 cropping seasons. Nitrogen fertilizer was applied in different total and split (basal + jointing stage) amounts, namely 0, 60+0, 120+0, 120+60, 120+120, and 120+180 kg ha⁻¹. In the N range of 0–240 kg ha⁻¹ in Wuqiao and 0–180 kg ha⁻¹ in Shunyi, the canopy temperature depression (CTD), normalized difference vegetation index (NDVI), biomass of wheat population, and population spikelets increased with the increase of N application amount, as a result, higher yield at maturity was obtained; however, further more N application had a negative effect, showing decreased thousand-kernel weight (TKW), translocation amount (TA) and efficiency (TE) of dry matter accumulated before flowering to grain, contribution efficiency (CE), harvest index (HI), partial factor productivity from applied N (PFP_N), N uptake

本研究由中国农业科学院科技创新工程, 国家公益性行业(农业)科研专项经费(201203033-2)和国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03)资助。

This study was supported by the Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS, the China Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201203033-2), and the China Agriculture Research System (CARS-03).

* 通讯作者(Corresponding author): 王志敏, E-mail: Zhimin206@263.net

第一作者联系方式: E-mail: lifajily@163.com

Received(收稿日期): 2016-01-31; Accepted(接受日期): 2016-06-20; Published online(网络出版日期): 2016-08-11.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20160811.1623.016.html>

efficiency (NUpE) and N utilization efficiency (NUtE). Zhongmai 175 had higher yield and yield stability than Jingdong 17 in different N application treatments, showing higher levels of spike number (SN), stability of kernel number per spike (KNS), kernel weight, population vitality, biomass, HI, dry matter accumulation before flowering, TA, and NUpE. These characters might be the physiological basis of high yield and high efficiency in Zhongmai 175. Considering the return from yield and economic benefits, we suggest that the recommended N application amounts for Zhongmai 175 and Jingdong 17 should be 180–240 kg ha⁻¹ in the northern part of Huang–Huai Rivers Valley Wheat Zone and 120–180 kg ha⁻¹ in the Northern Winter Wheat Zone. NDVI and CTD at middle to late grain filling stage can be used for rapid evaluation of varietal sensitivity to nitrogen because they are highly correlated with SN, yield, and biomass of wheat.

Keywords: Winter wheat; Nitrogen utilization efficiency; Dry matter; High yield; Stability

氮素是作物生长发育和增产的重要营养元素之一^[1-2], 但大量施氮不仅增加生产成本, 而且容易导致土壤养分失衡和环境污染^[3]。近年来, 在华北小麦主产区, 氮肥过量施用导致增产效益和氮素利用效率下降的现象较为明显^[4], 提高氮素利用效率是小麦生产可持续发展的必然要求^[5]。因此, 培育肥料利用效率高、高产稳产的新品种, 并采取合理的施肥策略在作物生产中具有重要意义, 并且节水、节肥、节药已成为未来我国粮食作物持续发展的战略选择。

为解决我国作物生产中肥料利用效率低、损失严重的问题, 前人对如何通过合理的栽培措施以提高生产效率进行了大量研究, 并提出了氮肥后移、以水控肥和以肥调水等高产优质栽培技术^[6-7]。但是, 由于对品种间肥料利用效率的遗传差异重视不够, 导致其遗传改良进展缓慢^[8]。已有的研究虽然在多方面探索了作物肥料吸收利用机制^[9-10], 但尚不明确作物氮肥敏感性的品种评价指标, 并缺乏大田条件下快速检测的方法。当前大面积推广的品种多在高肥条件下选育而成, 对土壤肥力和施肥量要求较高^[11]。生产中迫切需要能够适应不同肥力水平, 特别是低肥条件下肥料利用效率高、不减产或减产少, 高肥条件下耐肥性好、茎秆坚实不倒伏、高产高效的小麦新品种。中麦 175 通过了北部冬麦区水地和黄淮旱肥地 2 次国家审定以及北京、山西、河北、青海和甘肃 5 省(市)品种审定, 并已在这些地区大面积推广, 具有广泛的适应性^[12]。肖永贵等^[13]对京 411 及其 14 个衍生品种(系)在正常施肥和常年不施肥条件下比较表明, 中麦 175 的产量皆最高。另外, 对北部和黄淮麦区 64 份主要品种的氮和磷利用效率研究表明, 中麦 175 在不施氮、不施磷及氮和磷皆不施的 3 种处理中, 产量分别居参试品种的第 1、第 9 和第 1 位, 说明中麦 175 为肥料高效型品种^[14]。

为进一步探明中麦 175 对氮肥的反应特性及其机制, 本研究以中麦 175 和京冬 17 为材料, 通过限量灌溉下不同氮肥处理, 比较研究群体特性及氮素

吸收和利用、干物质积累和转运特征, 解析品种间和处理间产量变异原因, 探讨两品种对不同氮肥环境的响应机制和需肥规律, 以期为培育高产、稳产和广适性小麦新品种提供理论支撑和评价指标, 并为氮高效品种大面积推广提供技术指导。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

中麦 175 和京冬 17 的生育期相近(相差 1~2 d)。京冬 17 于 2007 年通过北部冬麦区国家审定。

1.2 试验设计

2013—2014 和 2014—2015 年分别在河北省沧州市吴桥县中国农业大学吴桥试验站(37.41° N, 116.57° E, 黄淮麦区北片)和北京市顺义区中国科学院作物科学研究所试验基地(40.16° N, 116.35° E, 北部冬麦区)进行试验。吴桥试验地为壤质底黏潮土, 地下水埋深 7 m 以上, 播前 0~20 cm 土壤含有机质 10.4 g kg⁻¹、全氮 0.83 g kg⁻¹、碱解氮 41.9 mg kg⁻¹、速效磷 23.9 mg kg⁻¹、速效钾 93.23 mg kg⁻¹, pH 为 7.7; 2013—2014 和 2014—2015 年度小麦季降水量分别为 121.9 mm 和 128.0 mm。顺义试验地为壤土, 播前 0~20 cm 土壤含有机质 12.2 g kg⁻¹、全氮 0.95 g kg⁻¹、碱解氮 106.7 mg kg⁻¹、速效磷 33.8 mg kg⁻¹、速效钾 183.4 mg kg⁻¹, pH 为 7.9; 2013—2014 和 2014—2015 年度小麦季降水量分别为 125.6 mm 和 127.0 mm。

在吴桥试验点设 6 个处理, 施氮量(基肥+拔节追肥)分别为纯氮 0+0、60+0、120+0、120+60、120+120 和 120+180 kg hm⁻², 随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 30 m²。分别于 2013 年 10 月 11 日和 2014 年 10 月 14 日播种, 行距 16 cm, 基本苗均为 345 万 hm⁻²。在顺义试验点设 5 个处理, 施氮量(基肥+拔节追肥)分别为 0+0、60+0、120+0、120+60 和 120+120 kg hm⁻², 随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 29.7 m²。分别于 2013 年 9 月 27 日和 2014 年 9 月 28 日播种, 行距 24 cm, 基本苗 300 万 hm⁻²。以

尿素作为氮肥, 基肥除氮肥外, 另施 P_2O_5 105 kg hm^{-2} 和 K_2O 75 kg hm^{-2} ; 追肥在拔节期施用。在拔节期和开花期浇水, 每次 75 mm。各小区除草、病虫害防治等田间管理措施均保持一致。

1.3 性状调查及其统计分析

于越冬期、拔节期、孕穗期、开花期和成熟期在各小区取 2 个 0.5 m 样段, 取样后剪掉根部, 将茎鞘、嫩叶、老叶、穗部分开, 105 杀青 30 min, 75 烘干后称重, 粉碎样品后用凯氏定氮法测定各器官中全氮含量。

开花期、灌浆前期和灌浆中后期, 用 GreenSeeker (Trimble, 美国) 测定归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI), 令传感器于小麦冠层 60 cm 上方保持平衡, 在小区非边行区域顺播种方向往返测定 2 次。用 REYTEK ST20XB 型手持式红外测温仪 (Reytek Corporation, 美国) 测定空气温度和冠层温度, 用两者差计算气冠温差 (canopy temperature depression, CTD), 光谱通带为 8~14 μm , 其灰度值为 0.95, 分别在开花期、灌浆前期和灌浆中后期选择晴朗无风少云的天气测定一次, 测量时间为 13:30—15:00^[15]。

在成熟期调查穗数、穗粒数和生物量, 在收获后测定产量、千粒重, 计算干物质转运量和氮素利用效率。

花前干物质转运量=开花期干物质积累量-(成熟期干物质积累量-籽粒产量)^[16], 花前干物质转运率=转运量/开花期干物质积累量^[16], 花前干物质贡献率=干物质转运量/籽粒产量^[16]; 收获指数=籽粒产量/生物学产量^[16]; 氮肥偏生产力 (PFP_N) = 籽粒产量/施氮量^[10], 氮素吸收效率 (NU_{pE}) = 植株氮素积累量/施氮量^[10], 氮素利用效率 (NU_{tE}) = 籽粒产量/植株氮素积累量^[10]。

利用 SAS 9.3 进行方差分析及处理间多重比较 (Duncan's 法)、品种间 *t* 测验, 采用 Microsoft Excel 绘制线性关系图。

2 结果与分析

2.1 产量相关性状的方差分析

除开花期 CTD 外的其他 17 个性状基因型差异皆达极显著 ($P < 0.01$) 水平; 所有性状的环境和氮肥效应皆达极显著水平 ($P < 0.01$); 多数性状存在显著的基因型×环境、基因型×处理或基因型×环境×处理互作效应 (表 1)。在 2 个试验点, 除个别性状外, 绝

大部分性状的基因型均方皆大于 1.5 倍基因型×年份互作均方, 即基因型效应显著大于基因型×年份互作效应, 因此可用均值表示产量相关性状。

2.2 不同施氮量下的产量性状

在 0~240 kg hm^{-2} (吴桥) 或 0~180 kg hm^{-2} (顺义) 施氮范围内, 随施氮量增加两品种的产量皆呈递增趋势, 且分别在 240 kg hm^{-2} 和 180 kg hm^{-2} 时产量最高, 过量施氮反而使产量降低。从产量三因素看, 两品种的穗数在吴桥和顺义均随施氮量增加而增加, 并分别在施氮 240 kg hm^{-2} 和 180 kg hm^{-2} 时最高; 穗粒数随施氮量增加呈递增趋势, 但施氮量超过 180 kg hm^{-2} 后处理间差异不显著; 千粒重均在低氮条件下较高, 随施氮量的增加呈降低趋势。两品种在吴桥的穗数、千粒重和产量均高于顺义, 而穗粒数则低于顺义, 说明环境可通过影响穗数、穗粒数和千粒重进而影响产量。在吴桥, 中麦 175 的产量显著高于京冬 17, 主要是其穗数显著较高, 其穗粒数和千粒重则低于京冬 17; 在顺义, 中麦 175 的穗数、千粒重和产量均高于京冬 17, 穗粒数无明显差异 (表 2)。从两地产量变异系数看, 中麦 175 为 2.0% 和 4.2%, 京冬 17 为 2.5% 和 5.1%, 说明中麦 175 的产量稳定性优于京冬 17。

2.3 不同施氮量下的群体特性

在开花期和灌浆前期, 随施氮量的增加, 两品种的 NDVI 和 CTD 在 2 个环境下均呈增加趋势, 而在灌浆中后期均呈先增加后降低趋势, 且分别在施氮量 240 kg hm^{-2} (吴桥) 和 180 kg hm^{-2} (顺义) 时达最大值。随灌浆进程, NDVI 先保持稳定后逐渐降低, 而 CTD 表现为先升高后降低, 说明群体灌浆速率和活性随着灌浆的进行先升高后降低 (表 3)。中麦 175 的 NDVI 和 CTD 在多数观测时间点高于京冬 17, 说明其群体绿色覆盖度和群体活性更高且持久。

2.4 不同施氮量下的干物质积累

两品种开花前、后的干物质积累量和生物量均随施氮量增加呈增加趋势, 开花前和开花后干物质积累比例在不同施氮处理间差异较小; 收获指数以不施氮处理最高, 随施氮量增加呈降低趋势。两品种开花前和开花后的干物质积累量、生物量和收获指数均表现吴桥点高于顺义点, 而顺义点的开花前干物质积累比例较高 (表 4)。两品种相比, 花前、花后和全生育期干物质积累量及收获指数均以中麦 175 高于京冬 17, 说明中麦 175 在后期可能具有较强的抵抗环境胁迫能力和较高的物质转运能力。

表 1 小麦冠层温差、干物质积累、产量及氮素利用相关性状的均方差
Table 1 Mean squares of wheat traits related to canopy temperature depression, dry matter accumulation, yield and nitrogen utilization

性状 Trait	基因型 Genotype (G) (df: 1)	环境 Environment (E) (df: 3)	重复 Repeat (df: 2)	处理 Treatment (T) (df: 5)	基因型×环境 G×E (df: 3)	基因型×处理 G×T (df: 5)	基因型×环境×处理 G×E×T (df: 26)	误差 Error (df: 86)
产量组分 Yield component								
产量 Yield	5042158.30**	33876552.70**	16239.20	1661250.60**	150321.60*	21486.50	138755.00**	19209.90
穗数 Spike number	54940.06**	131230.47**	226.00	6756.91**	6104.05**	411.18*	343.58**	166.56
穗粒数 Kernel number per spike	15.22**	75.23**	1.51*	11.35**	4.00**	0.54	0.92**	0.39
千粒重 Thousand-kernel weight	10.24**	762.25**	0.03	17.76**	13.11**	0.47	1.90**	0.61
归一化植被指数 NDVI								
开花期 Flowering stage	0.0023**	0.0446**	0.0003	0.0050**	0.0021**	0.0001	0.0008**	0.0001
灌浆前期 Early stage of filling	0.0039**	0.0461**	0.0002	0.0104**	0.0030**	0.0003	0.0007**	0.0001
灌浆中后期 Middle-late stage of filling	0.0142**	0.0247**	0.0005	0.0116**	0.0011*	0.0005	0.0005	0.0003
开花期 Flowering stage	0.12	13.72**	0.09	0.46**	9.23**	0.04	0.05	0.08
CTD								
灌浆前期 Early stage of filling	6.44**	9.50**	0.10	1.57**	1.22**	0.14	0.14	0.10
灌浆中后期 Middle-late stage of filling	11.30**	10.49**	0.01	2.56**	2.49**	0.02	0.15**	0.05
干物质积累 Dry matter accumulation								
生物量 Biomass	96369.68**	351575.57**	347.35	54611.54**	87.62	655.66*	777.59**	230.83
收获指数 Harvest index	14.27**	75.15**	0.15	7.48**	0.40	0.07	0.48*	0.28
转运量 Translocation amount	10179.05**	10754.18**	28.66	1611.92**	472.34**	34.57	111.36	97.35
转运率 Translocation efficiency	41.56**	14.74**	0.05	36.32**	2.12*	0.09	1.27*	0.74
贡献率 Contribution efficiency	46.20**	26.40**	0.11	56.61**	3.83	0.08	2.42	1.73
氮素利用效率 NUtE	5.73**	220.33**	0.23	86.94**	2.26*	2.21**	3.46**	0.60
自由度 df	1	3	2	4	3	4	20	70
氮肥偏生产力 PFP _N	287.69**	2011.58**	0.19	36014.80**	20.52**	43.99**	83.09**	1.62
氮素吸收效率 NUtP	0.1158**	0.3437**	0.0019*	23.1133**	0.0120**	0.0049**	0.0422**	0.0005

* P<0.05, ** P<0.01. NUtE: N utilization efficiency; PFP_N: partial factor productivity from applied N; NUtP: N uptake efficiency.

表 2 不同施氮处理对中麦 175 和京冬 17 产量相关性状的影响
Table 2 Effects of different N treatments on yield related traits in Zhongmai 175 and Jingdong 17

处理 Treatment	中麦 175 Zhongmai 175				京冬 17 Jingdong 17			
	穗数 SN (m ⁻²)	穗粒数 KNS	千粒重 TKW (g)	产量 Yield (kg hm ⁻²)	穗数 SN (m ⁻²)	穗粒数 KNS	千粒重 TKW (g)	产量 Yield (kg hm ⁻²)
河北吴桥 Wuqiao, Hebei								
N0	659.7 c	30.4 d	45.8 a	8126 d	608.0 c	30.9 d	47.0 a	7608 d
N60	687.6 b	30.9 cd	44.9 ab	8629 c	625.7 bc	31.9 c	46.5 ab	8014 c
N120	698.9 b	31.3 bc	44.3 bc	8810 bc	645.0 ab	32.6 bc	45.9 bc	8149 c
N120+60	723.8 a	31.7 ab	43.7 c	8966 b	650.3 a	33.4 ab	45.5 c	8552 ab
N120+120	729.5 a	31.9 a	43.4 c	9223 a	649.9 a	33.7 a	45.2 c	8757 a
N120+180	723.3 a	32.2 a	43.4 c	8888 b	647.1 ab	33.8 a	45.0 c	8502 b
平均值 Mean	703.8 A	31.4 B	44.2 B	8774 A	637.7 B	32.7 A	45.8 A	8264 B
北京顺义 Shunyi, Beijing								
N0	546.0 d	32.6 b	40.3 a	6848 d	533.9 b	32.6 c	39.9 a	6479 c
N60	552.6 cd	33.7 a	40.3 a	6997 c	545.5 ab	33.4 ab	39.2 a	6716 b
N120	562.9 bc	33.0 ab	39.2 ab	7050 bc	549.6 a	33.1 bc	38.2 b	6788 ab
N120+60	583.3 a	33.7 a	38.6 b	7221 a	560.5 a	34.1 a	37.8 b	6915 a
N120+120	575.6 ab	33.6 a	38.0 b	7120 ab	557.2 a	33.5 ab	38.1 b	6838 ab
平均值 Mean	564.1 A	33.3 A	39.3 A	7047 A	549.3 A	33.3 A	38.6 A	6747 B

同一试点, 数据后不同小写字母表示处理间有显著差异, 不同大写字母表示品种间差异显著($P < 0.05$)。

In each location, different lowercase and uppercase letters after data indicate significant difference among treatments and between cultivars at $P < 0.05$, respectively. SN: spike number; KNS: kernel number per spike; TKW: thousand-kernel weight.

表 3 不同施氮处理对中麦 175 和京冬 17 NDVI 和 CTD 的影响
Table 3 Effects of different N treatments on NDVI and CTD in Zhongmai 175 and Jingdong 17

处理 Treatment	中麦 175 Zhongmai 175						京冬 17 Jingdong 17					
	NDVI1	NDVI2	NDVI3	CTD1	CTD2	CTD3	NDVI1	NDVI2	NDVI3	CTD1	CTD2	CTD3
河北吴桥 Wuqiao, Hebei												
N0	0.750 c	0.737 c	0.552 c	5.37 c	7.20 c	4.34 d	0.735 b	0.728 c	0.528 c	4.93 b	6.47 b	3.55 c
N60	0.767 b	0.772 b	0.591 b	5.55 bc	7.58 b	4.95 c	0.770 a	0.760 b	0.543 bc	5.07 ab	6.87 a	3.97 b
N120	0.781 b	0.791 a	0.608 ab	5.67 ab	7.65 ab	5.06 bc	0.773 a	0.774 ab	0.563 ab	5.25 a	6.87 a	4.17 ab
N120+60	0.796 a	0.796 a	0.616 ab	5.68 ab	7.85 a	5.37 ab	0.781 a	0.769 ab	0.577 a	5.25 a	6.92 a	4.35 a
N120+120	0.801 a	0.808 a	0.632 a	5.82 ab	7.73 ab	5.41 a	0.786 a	0.782 a	0.589 a	5.33 a	6.90 a	4.45 a
N120+180	0.799 a	0.804 a	0.624 a	5.92 a	7.63 ab	5.31 ab	0.789 a	0.789 a	0.579 a	5.35 a	7.17 a	4.30 a
平均值 Mean	0.782 A	0.784 A	0.604 A	5.67 A	7.61 A	5.08 A	0.772 B	0.767 B	0.563 B	5.20 B	6.86 B	4.13 B
北京顺义 Shunyi, Beijing												
N0	0.835 b	0.822 c	0.603 c	6.05 b	6.75 b	3.43 c	0.822 b	0.810 c	0.584 d	6.39 b	6.53 b	3.15 c
N60	0.840 ab	0.827 c	0.622 b	6.08 ab	6.84 b	3.57 c	0.830 a	0.833 b	0.605 c	6.52 ab	6.69 b	3.35 c
N120	0.843 ab	0.837 b	0.628 b	6.15 ab	6.83 b	3.83 b	0.832 a	0.830 b	0.620 bc	6.74 ab	6.93 ab	3.67 b
N120+60	0.842 ab	0.850 a	0.655 a	6.37 ab	7.60 a	4.12 a	0.837 a	0.837 ab	0.642 a	6.78 ab	7.27 a	4.00 a
N120+120	0.848 a	0.852 a	0.647 a	6.39 a	7.60 a	4.02 a	0.837 a	0.847 a	0.633 ab	6.85 a	7.30 a	3.80 ab
平均值 Mean	0.842 A	0.837 A	0.631 A	6.20 A	7.12 A	3.79 A	0.831 B	0.831 B	0.617 B	6.65 A	6.94 A	3.59 B

NDVI1、NDVI2 和 NDVI3 分别表示开花期、灌浆前期和灌浆中后期的归一化植被指数, CTD1、CTD2 和 CTD3 分别表示开花期、灌浆前期和灌浆中后期的气冠温差。同一试点, 数据后不同小写字母表示处理间有显著差异, 不同大写字母表示品种间差异显著($P < 0.05$)。

NDVI1, NDVI2, and NDVI3 indicate normalized difference vegetation index in flowering stage, early stage of grain filling and middle to late stage of grain filling, respectively; CTD1, CTD2, and CTD3 indicate canopy temperature depression in flowering stage, early stage of grain filling and middle to late stage of grain filling, respectively. In each location, different lowercase and uppercase letters after data indicate significant difference among treatments and between cultivars at $P < 0.05$, respectively.

表 4 不同施氮处理对小麦 175 和京冬 17 干物质积累的影响
Table 4 Effects of different N treatments on dry matter accumulation in Zhongmai 175 and Jingdong 17

处理 Treatment	中麦 175 Zhongmai 175						京冬 17 Jingdong 17						
	播种-开花 Sowing-flowering			开花-成熟 Flowering-maturity			播种-开花 Sowing-flowering			开花-成熟 Flowering-maturity			
	干重 DW (kg m ⁻²)	比例 (%)	Ratio (%)	干重 DW (kg m ⁻²)	比例 (%)	Ratio (%)	干重 DW (kg m ⁻²)	比例 (%)	Ratio (%)	干重 DW (kg m ⁻²)	比例 (%)	Ratio (%)	
河北吴桥 Wuqiao, Hebei													
N0	1.11 d	65.4 a	34.6 a	0.59 c	34.6 a	50.2 a	1.06 d	65.3 ab	34.7 bc	0.56 d	50.2 a	1.63 e	49.5 a
N60	1.15 c	65.3 a	34.7 a	0.61 b	34.7 a	49.6 b	1.10 c	65.5 a	34.5 c	0.58 c	49.6 b	1.68 d	48.6 b
N120	1.17 b	65.6 a	34.4 a	0.61 b	34.4 a	49.0 bc	1.12 b	64.8 bc	35.2 ab	0.61 b	49.0 bc	1.73 c	48.6 b
N120+60	1.18 ab	65.0 a	35.0 a	0.63 a	35.0 a	48.6 cd	1.14 a	65.0 abc	35.0 abc	0.61 b	48.6 cd	1.76 b	48.3 b
N120+120	1.18 ab	64.8 a	35.2 a	0.64 a	35.2 a	48.7 cd	1.14 a	64.5 c	35.5 a	0.63 a	48.7 cd	1.77 ab	48.4 b
N120+180	1.19 a	64.8 a	35.2 a	0.64 a	35.2 a	48.2 d	1.15 a	64.7 c	35.3 a	0.63 a	48.2 d	1.78 a	47.8 b
平均值 Mean	1.16 A	65.1 A	34.9 A	0.62 A	34.9 A	49.1 A	1.12 B	65.0 A	35.0 A	0.60 A	49.1 A	1.73 B	48.5 B
北京顺义 Shunyi, Beijing													
N0	1.04 c	68.1 a	32.0 a	0.49 d	32.0 a	47.3 a	1.00 c	68.3 ab	32.1 a	0.47 b	47.3 a	1.47 d	46.7 a
N60	1.07 b	67.9 a	32.3 a	0.51 cd	32.3 a	46.5 bc	1.03 b	68.0 abc	32.3 a	0.49 b	46.5 bc	1.51 c	46.0 b
N120	1.08 b	67.5 ab	32.4 a	0.52 bc	32.4 a	46.2 c	1.06 a	68.0 a	31.6 a	0.49 b	46.2 c	1.55 b	45.3 b
N120+60	1.09 a	66.8 b	33.5 a	0.55 a	33.5 a	46.8 b	1.07 a	67.0 bc	32.5 a	0.52 a	46.8 b	1.59 a	45.4 b
N120+120	1.10 a	67.1 b	33.0 a	0.54 ab	33.0 a	46.1 c	1.06 a	67.2	32.7 a	0.52 a	46.1 c	1.59 a	45.2 b
平均值 Mean	1.08 A	67.4 A	32.6 A	0.52 A	32.6 A	46.5 A	1.04 B	67.8 A	32.2 A	0.50 A	46.5 A	1.54 B	45.7 B

同一试点, 数据后不同小写字母表示处理间有显著差异, 不同大写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

In each location, different lowercase and uppercase letters after data indicate significant difference among treatments and between cultivars at $P < 0.05$, respectively. DW: dry weight; HI: harvest index.

2.5 不同施氮量下的物质转运

表5表明, 两品种的开花前干物质积累量向籽粒转运量、转运率和对籽粒的贡献率在低氮下较高、随施氮量增加均呈降低趋势, 说明两品种均具有一定适应低氮胁迫、通过调节干物质转运获得一定产量水平的能力。开花前干物质积累量向籽粒转运量和转运率在吴桥较高, 而对籽粒的贡献率则是顺义较高, 说明环境可以影响物质分配。中麦175在2个环境不同施氮条件下的开花前干物质积累量向籽粒转运量、转运率和对籽粒的贡献率均高于京冬17, 说明中麦175具有更强的花后干物质转运能力。

2.6 不同施氮量下的氮素吸收和利用效率

表6表明, 氮肥偏生产力随施氮量增加而降低, 中麦175的氮肥生产效率在吴桥和顺义皆高于京冬17。从氮素吸收和利用效率来看, 两品种在吴桥和顺义均随施氮量增加呈降低趋势, 且在不同氮素处理间差异显著, 说明在氮肥不足时冬小麦会增加对土壤氮素的吸收和利用能力。两品种在吴桥的氮素利用效率高于顺义, 氮素吸收效率则低于顺义, 说明环境可影响品种的氮素吸收和利用效率。中麦175在吴桥和顺义的氮素吸收和利用效率皆高于京冬17, 这与其氮肥偏生产力较高是一致的。

表5 不同施氮处理对中麦 175 和京冬 17 物质转运的影响
Table 5 Effects of different N treatments on dry matter translocation in Zhongmai 175 and Jingdong 17

处理 Treatment	中麦 175 Zhongmai 175			京冬 17 Jingdong 17		
	转运量 TA (kg m ⁻²)	转运率 TE (%)	贡献率 CE (%)	转运量 TA (kg m ⁻²)	转运率 TE (%)	贡献率 CE (%)
河北吴桥 Wuqiao, Hebei						
N0	0.266 a	23.9 a	31.1 a	0.242 a	22.7 a	30.0 a
N60	0.261 ab	22.8 ab	30.1 a	0.238 ab	21.5 b	29.0 a
N120	0.259 abc	22.2 b	29.7 a	0.233 ab	20.8 bc	27.7 b
N120+60	0.247 bcd	21.0 c	28.1 b	0.233 ab	20.4 c	27.5 b
N120+120	0.245 cd	20.7 c	27.6 b	0.228 bc	20.0 cd	26.6 bc
N120+180	0.237 d	20.1 c	27.0 b	0.222 c	19.3 d	26.1 c
平均值 Mean	0.253 A	21.8 A	28.9 A	0.233 B	20.8 B	27.8 B
北京顺义 Shunyi, Beijing						
N0	0.237 a	22.6 a	32.6 a	0.220 a	21.9 a	32.1 a
N60	0.227 b	21.2 b	30.9 b	0.212 ab	20.7 ab	30.4 a
N120	0.220 bc	20.3 bc	29.7 bc	0.211 ab	19.9 bc	30.1 ab
N120+60	0.224 bc	20.4 bc	29.2 c	0.200 b	18.7 c	27.6 b
N120+120	0.215 c	19.6 c	28.6 c	0.197 b	18.6 c	27.5 b
平均值 Mean	0.224 A	20.9 A	30.2 A	0.208 B	19.9 B	29.6 B

同一试点, 数据后不同小写字母表示处理间有显著差异, 不同大写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

In each location, different lowercase and uppercase letters after data indicate significant difference among treatments and between cultivars at $P < 0.05$, respectively. TA: translocation amount; TE: translocation efficiency; CE: contribution efficiency.

2.7 群体特征与产量性状的相关性分析

灌浆中后期的 NDVI 和 CTD 与穗数、产量和生物量均呈显著或极显著正相关, 决定系数均在 0.6 以上(图 1)。因此, 灌浆中后期的 NDVI 和 CTD 可作为快速评价冬小麦在不同施氮水平下产量表现即氮肥敏感性的指标。中麦 175 在不同处理与环境下灌浆中后期的 NDVI 和 CTD 更稳定, 即在氮肥胁迫条件下能够保持较好的活力, 因此产量也更稳定。

3 讨论

3.1 不同施氮量对冬小麦产量相关性状的影响

本研究表明, 适量增加施氮量可提高产量, 主要得益于单位面积穗数的提高。随施氮量的增加, 开花前干物质积累量向籽粒转运量、转运率、对籽粒的贡献率、收获指数、氮素吸收和利用效率均呈降低趋势, 这与张宏等^[17]和 Rampino 等^[18]的研究结果相符, 可能与作物自身调节能力有关。在土壤养

表 6 不同施氮处理对中麦 175 和京冬 17 氮肥偏生产力、氮素吸收和利用效率的影响
Table 6 Effects of different N treatments on PFP_N, NUpE, and NUtE in Zhongmai 175 and Jingdong 17 (kg kg⁻¹)

处理 Treatment	氮肥偏生产力 PFP _N		氮素吸收效率 NUpE		氮素利用效率 NUtE	
	中麦 175 Zhongmai 175	京冬 17 Jingdong 17	中麦 175 Zhongmai 175	京冬 17 Jingdong 17	中麦 175 Zhongmai 175	京冬 17 Jingdong 17
河北吴桥 Wujiao, Hebei						
N0					41.21 a	40.78 a
N60	144.65 a	133.56 a	3.51 a	3.40 a	41.07 a	39.31 ab
N120	73.69 b	67.91 b	1.88 b	1.83 b	39.03 b	37.10 c
N120+60	49.81 c	47.51 c	1.33 c	1.26 c	37.40 c	37.74 bc
N120+120	38.43 d	36.49 d	1.03 d	0.98 d	37.11 c	37.04 c
N120+180	31.30 e	29.33 e	0.85 e	0.82 e	34.91 d	34.63 d
平均值 Mean	67.58 A	62.96 B	1.72 A	1.66 B	38.46 A	37.77 A
北京顺义 Shunyi, Beijing						
N0					36.37 a	36.44 a
N60	116.62 a	111.94 a	3.30 a	3.17 a	35.93 a	34.95 b
N120	58.75 b	56.57 b	1.73 b	1.66 b	34.35 b	34.28 b
N120+60	40.17 c	38.42 c	1.23 c	1.16 c	33.18 c	33.04 c
N120+120	29.67 d	28.49 d	0.95 d	0.89 d	32.17 d	32.29 c
平均值 Mean	61.29 A	58.85 B	1.80 A	1.72 B	34.40 A	34.20 A

同一试点, 数据后不同小写字母表示处理间有显著差异, 不同大写字母表示品种间差异显著($P < 0.05$).

In each location, different lowercase and uppercase letters after data indicate significant difference among treatments and between cultivars at $P < 0.05$, respectively. NUtE: N utilization efficiency; PFP_N: partial factor productivity from applied N; NUpE: N uptake efficiency.

分亏缺时, 作物通过提高肥料吸收和利用效率以满足自身需求, 并提高开花前干物质积累量向籽粒转运量和转运率以获得一定产量; 而在土壤养分充足时, 作物体内硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶的活性增加^[19], 从而促进地上部生物量积累, 为籽粒灌浆提供足够的养分储备, 最终增加产量。

NDVI 反映了地表绿色植被的覆盖比例, 可用于评价作物生物量积累速率及叶片功能期长短。肖永贵等^[13]发现冬小麦 NDVI 在不施氮和正常施氮处理间存在极显著差异, 李升东等^[20]认为不同基因型冬小麦各生育期的 NDVI 存在显著差异, 抽穗期的 NDVI 值与其干旱产量指数呈正相关。本研究表明, 限水条件下在施氮量 0~240 kg hm⁻² (吴桥) 或 0~180 kg hm⁻² (顺义) 范围内, 增加施氮量可提高各时期干物质积累量并延缓衰老, 即增加 NDVI 值。CTD 作为反映环境变化对作物生长发育作用的重要指标, 已越来越多地用于抗旱、耐热和养分亏缺的研究, 一般认为增加施氮量可降低冠层温度即提高 CTD, 但不同时期结果有一定差异^[21-22]。本研究表明, 限水条件下在施用氮肥 0~240 kg hm⁻² (吴桥) 或 0~180 kg hm⁻² (顺义) 范围内, 增加施氮量可提高冬小麦开

花期、灌浆前期和灌浆中后期的 CTD, 并且随着时间的推移作用更为明显, 这可能是适宜的施氮量提高了群体叶片活性, 增加了单位面积生物量和叶片光合能力。NDVI 和 CTD 在一定程度上反映了作物群体活性, 不同氮肥处理间二者变化趋势与产量趋势基本一致, NDVI 和 CTD 的稳定性对品种高产稳产具有重要作用。

3.2 不同品种间产量与氮素利用效率的差异

不同群体冠层结构对冠层氮素分布有明显影响, 叶片平展型群体中叶片氮素含量随叶层下移而下降的速度要快于紧凑型^[23]。中麦 175 具有株型紧凑、叶片较小且直立、分蘖多、冠层结构合理等优良特性, 对促进氮素吸收、提高物质转运和增加产量形成具有重要作用。

中麦 175 穗数多, 穗粒数和千粒重在不同环境下稳定性好, 因而具有较高的丰产性和稳产性, 相对于京冬 17, 在多数环境下的 NDVI 和 CTD 较高, 且在灌浆中后期不同氮素处理间稳定性较好, 即在灌浆前期群体活力高, 灌浆中后期对氮肥胁迫耐受性更好、活力更持久。小麦生物量积累可分为开花前、后 2 个时期, 开花前贮藏碳水化合物再转运及

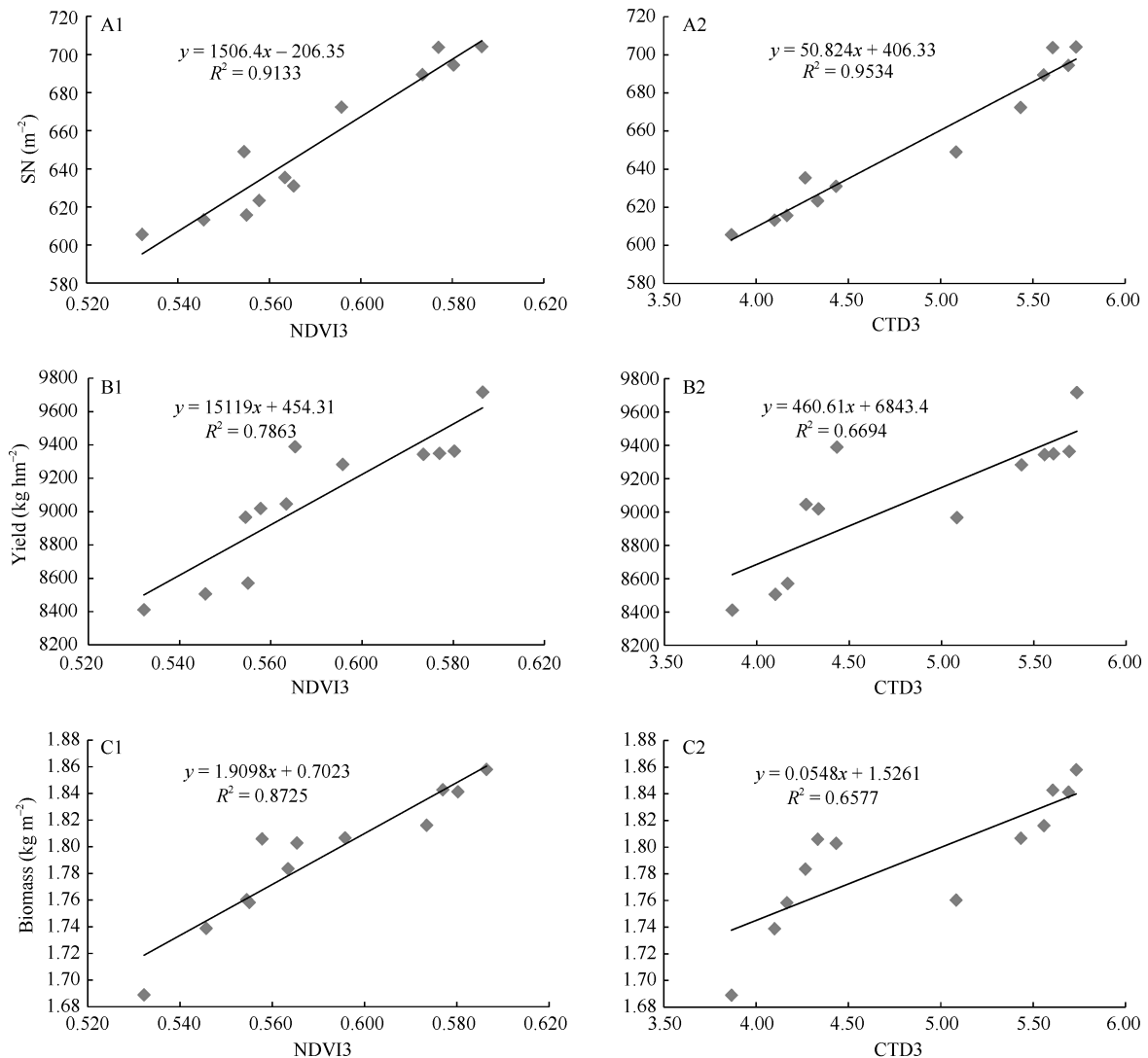


图 1 中麦 175 和京冬 17 灌浆中后期 NDVI 和 CTD 与穗数、产量和生物量的线性关系

Fig. 1 Correlation of CTD, NDVI in middle to late stage of grain filling with SN, yield and biomass in Zhongmai 175 and Jingdong 17

开花后光合产物积累是籽粒产量的主要来源^[24]。有研究表明,开花前的光合产物对籽粒产量的贡献占 3%~30%,对抵御后期高温、干旱胁迫、维持产量稳定具有重要作用^[21];开花后光合产物对籽粒的贡献率占 60%~80%,是高产的主要物质来源^[25]。中麦 175 的花前和花后干物质积累量及收获指数均高于京冬 17,且开花前干物质积累量向籽粒转运量、转运率、对籽粒的贡献率均更高,说明中麦 175 具有更高的花前干物质积累量和更强的花后干物质转运能力,对保证高产稳产具有重要作用。另外,与京冬 17 相比,中麦 175 在不同氮肥环境下氮素吸收效率皆较高,氮素利用效率在施氮量 0~120 kg hm⁻² 的低氮范围内更高。氮素吸收效率高是其总体肥料利用效率高的关键,这与肖永贵等^[13]研究结果一致,与我们

之前认为中麦 175 苗期具有较强耐低肥能力的结果相佐证^[26]。

3.3 氮高效型品种筛选指标及施肥策略

对后代品系进行多点试验及抗旱、耐热、养分胁迫、抗病性鉴定已经成为国际玉米小麦改良中心 (CIMMYT) 小麦新品种选育的重要方式^[22]。我国大多数育种单位还不能做到育种材料的多点鉴定和广泛筛选,导致缺乏抗逆性强、适应性广的高产稳产品种。群体特性在一定程度上反映了作物对不同环境的适应性,已有研究把幼苗早期活性、冠层温度、灌浆期叶片衰老等作为品种适应性和高世代育种选择标准^[27-30]。本研究表明,灌浆中后期(开花后 20 d 左右)的 NDVI 和 CTD 与穗数、产量和生物量在所有环境下均呈显著或极显著正相关,可作为快速评

价品种肥料敏感性的指标。中麦 175 的育成及其在北部冬麦区水地、黄淮旱肥地及甘肃和青海春麦区的大面积推广表明, 培育高产且广适的品种是可行的, 其优良特性可为育种家培育新品种提供借鉴。

受地力、气候环境和种植模式等因素的影响, 不同地区小麦对氮肥需求量有所不同^[31]。北方小麦氮肥施用量一般为 180~250 kg hm⁻², 淮北地区为 195~225 kg hm⁻², 晋南旱作地区为 180 kg hm⁻²左右, 四川丘陵旱地为 135~180 kg hm⁻² [31-32]。本研究表明, 在磷肥、钾肥一定的条件下, 中麦 175 和京冬 17 在基施氮肥 120 kg hm⁻²+拔节期追施氮肥 60~120 kg hm⁻² (吴桥) 或基施氮肥 120 kg hm⁻²+拔节期追施氮肥 60 kg hm⁻² (顺义) 可获得较高产量。考虑到施氮量超过 240 kg hm⁻² (吴桥) 或 180 kg hm⁻² (顺义) 不仅减产, 而且还显著减效的情况, 我们推荐中麦 175 和京冬 17 在黄淮麦区(北片)的施氮量为 180~240 kg hm⁻², 在北部冬麦区施氮量为 120~180 kg hm⁻²。在此施氮量和采用春季浇 2 次水的节水栽培模式下, 适宜的施肥模式是基肥+拔节肥, 其施肥比例应根据土壤肥力适当调整, 如土壤肥力较差, 应适当增加基肥比例, 如土壤肥力较好, 则应减少基肥比例。

4 结论

在不同地点和不同氮肥处理下, 中麦 175 产量和氮肥生产率皆高于京冬 17。穗数多、穗粒重稳定性好、群体活力持久、生物量高、花前干物质积累和花后干物质转运能力强、氮素吸收效率高是中麦 175 在不同氮水平下高产高效的重要原因。灌浆中后期的 NDVI 和 CTD 与穗数、产量和生物量呈显著或极显著正相关, 二者可协同作为评价品种肥料敏感性的指标。

References

- [1] Erisman J W, Galloway J A, Sutton M S, Klimont Z, Winiwater W. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nat Geosci*, 2008, 1: 636-639
- [2] 霍中洋, 葛鑫, 张洪程, 戴其根, 许轲, 龚振凯. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响. *作物学报*, 2004, 30: 449-454
Huo Z Y, Ge X, Zhang H C, Dai Q G, Xu K, Gong Z K. Effect of different nitrogen application types on N-absorption and N-utilization rate of specific use cultivars of wheat. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 449-454 (in Chinese with English abstract)
- [3] Goulding K W T. Minimising losses of nitrogen from UK agriculture. *J R Agric Soc Eng*, 2004, 165: 1-11
- [4] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 李春俭, 陈新平. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略. *植物学通报*, 2007, 24: 687-694
Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, Li C J, Chen X P. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies. *Chin Bull Bot*, 2007, 24: 687-694 (in Chinese with English abstract)
- [5] 王志敏, 王璞, 李绪厚, 李建民, 鲁来清. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术. *中国农业科技导报*, 2006, 8(5): 38-44
Wang Z M, Wang P, Li X H, Li J M, Lu L Q. Principle and technology of water-saving fertilizer-saving high-yielding and simple cultivation in winter wheat. *Rev China Agric Sci Technol*, 2006, 8(5): 38-44 (in Chinese with English abstract)
- [6] 潘庆民, 于振文, 王月福, 田奇卓. 公顷产 9000 kg 小麦氮素吸收分配的研究. *作物学报*, 1999, 25: 541-547
Pan Q M, Yu Z W, Wang Y F, Tian Q Z. Studies on uptake and distribution of nitrogen in wheat at the level of 9000 kg per hectare. *Acta Agron Sin*, 1999, 25: 541-547 (in Chinese with English abstract)
- [7] 王晨阳, 朱云集, 夏国军, 朱家永, 李久星, 王永华, 罗毅. 氮肥后移对超高产小麦产量及生理特性的影响. *作物学报*, 1998, 24: 978-983
Wang C Y, Zhu Y J, Xia G J, Zhu J Y, Li J X, Wang Y H, Luo Y. Effects of application nitrogen at the later stage on grain yield and plant physiological characteristics of super-high-yielding winter wheat. *Acta Agron Sin*, 1998, 24: 978-983 (in Chinese with English abstract)
- [8] Cormier F, Faure S, Dubreuil P, Heumez E, Beauchene K, Lafarge S, Praud S, Gouis J L. A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theor Appl Genet*, 2013, 126: 3035-3048
- [9] Celine M D, Françoise D V, Julie D, Fabien C, Laure G, Akira S. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Ann Bot*, 2010, 105: 1141-1157
- [10] Xu G H, Fan X R, Miller A J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Plant Biol*, 2012, 63: 153-182
- [11] Masclaux-Daubresse C, Reisdorf-Cren M, Orsel M. Leaf nitrogen remobilisation for plant development and grain filling. *Plant Biol*, 2008, 10: 23-36
- [12] 李兴茂, 倪胜利. 不同水分条件下广适性小麦品种中麦 175 的农艺和生理特性解析. *中国农业科学*, 2015, 48: 4374-4380
Li X M, Ni S L. Agronomic and physiological characterization of the wide adaptable wheat cultivar Zhongmai 175 under two different irrigation conditions. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 4374-4380 (in Chinese with English abstract)
- [13] 肖永贵, 李思敏, 李法计, 张宏燕, 陈新民, 王德森, 夏先春, 何中虎. 两种施肥环境下冬小麦京 411 及其衍生系产量和生理性状的遗传分析. *作物学报*, 2015, 41: 1333-1342
Xiao Y G, Li S M, Li F J, Zhang H Y, Chen X M, Wang D S, Xia X C, He Z H. Genetic analysis of yield and physiological traits in elite parent Jing 411 and its derivatives under two fertilization environments. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 1333-1342 (in Chinese with English abstract)
- [14] 何中虎, 陈新民, 王德森, 张艳, 肖永贵, 李法计, 张勇, 李思敏, 夏先春, 张运宏, 庄巧生. 中麦 175 高产高效广适特性解析与育种方法思考. *中国农业科学*, 2015, 48: 3394-3403
He Z H, Chen X M, Wang D S, Zhang Y, Xiao Y G, Li F J, Zhang

- Y, Li S M, Xia X C, Zhang Y H, Zhuang Q S. Characterization of wheat cultivar Zhongmai 175 with high yielding potential, high water and fertilizer use efficiency, and broad adaptability. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 3394–3403 (in Chinese with English abstract)
- [15] Reynolds M P, Nagarajan S, Razzaque M A, Ageeb O A A. Heat tolerance. In: Reynolds M P, Ortiz-Monasterio J I, McNab A, eds. *Application of Physiology in Wheat Breeding*. Mexico: CIMMYT Press, 2001. pp 124–135
- [16] Dordas C A, Sioulas C. Dry matter and nitrogen accumulation, partitioning, and retranslocation in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) as affected by nitrogen fertilization. *Field Crops Res*, 2009, 110: 35–43
- [17] 张宏, 周建斌, 刘瑞, 张鹏, 郑险峰, 李生秀. 不同栽培模式及施氮对半旱地冬小麦/夏玉米氮素累积、分配及氮肥利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17: 1–8
- Zhang H, Zhou J B, Liu R, Zhang P, Zheng X F, Li S X. Effects of different cultivation patterns and nitrogen fertilizer on accumulation, distribution and use efficiency of nitrogen in winter wheat/summer maize rotation system on semi-dry land farming. *Plant Nutr Fert Sci*, 2011, 17: 1–8 (in Chinese with English abstract)
- [18] Rampino P, Stefano Pataleo, Carmela Gerardi, Ginvanni Mita, Carla Perrotta. Drought stress response in wheat: physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes. *Plant, Cell & Environ*, 2006, 29: 2143–2152
- [19] 赵鹏, 何建国, 熊淑萍, 马新明, 张娟娟, 王志强. 氮素形态对专用小麦旗叶酶活性及自理蛋白质和产量的影响. *中国农业大学学报*, 2010, 15(3): 29–34
- Zhao P, He J G, Xiong S P, Ma X M, Zhang J J, Wang Z Q. Studies on the effects of different nitrogen forms on enzyme activity in flag leaves in wheat and protein and yield of grain for specialized end-uses. *J China Agric Univ*, 2010, 15(3): 29–34 (in Chinese with English abstract)
- [20] 李升东, 王法宏, 司纪升, 孔令安, 冯波, 张宾. 不同基因型小麦 NDVI 值与产量的关系. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(6): 47–50
- Li S D, Wang F H, Si J S, Kong L A, Feng B, Zhang B. The relationship between normalized difference vegetation index and yield of different genotype wheat varieties. *Agric Res Arid Areas*, 2008, 26(6): 47–50 (in Chinese with English abstract)
- [21] Blad B L, Bauer A, Hatfield J L, Hubbard K G, Kanemasu E T, Reginato R.J. Influence of water and nitrogen levels on canopy temperatures of winter wheat grown in the North American Great Plains. *Agric For Meteorol*, 1988, 44: 159–173
- [22] Hegde D M. Effect of irrigation and N fertilization on water relation, canopy temperature, yield, N uptake and water use of onion. *Indian J Agric Sei*, 1986, 56: 858–867
- [23] Anten N P R, Schieving F, Werger M J A. Patterns of light and nitrogen distribution in relation to whole canopy carbon gain in C₃ and C₄ mono and dicotyledonous species. *Oecologia*, 1995, 101: 504–513
- [24] Ehdaie B, Alloush G A, Madore M A, Waines J G. Genotype variation for stem reserves and mobilization in wheat: II. Post-anthesis changes in internode water-soluble carbohydrates. *Crop Sci*, 2006, 46: 2094–2104
- [25] Mullen R W, Freeman K W, Raun W L, Raun W R, Johnson G V, Stone M L, Solie J B. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. *Agron J*, 2003, 95: 347–351
- [26] 李法计, 肖永贵, 金松灿, 夏先春, 陈新民, 汪洪, 何中虎. 京 411 及其衍生系苗期氮和磷利用效率相关性状的遗传分析. *麦类作物学报*, 2015, 35: 737–746
- Li F J, Xiao Y G, Jin S C, Xia X C, Chen X M, Wang H, He Z H. Genetic analysis of nitrogen and phosphorus utilization efficiency related traits at seeding stage of Jing 411 and its derivatives. *J Triticeae Crops*, 2015, 35: 737–746 (in Chinese with English abstract)
- [27] Babar M A, van Ginkel M, Klatt A R, Prasad B, Reynolds M P. The potential of using spectral reflectance indices to estimate yield in wheat grown under reduced irrigation. *Euphytica*, 2006, 150: 155–172
- [28] Chen J, Liang Y, Hu X, Wang X, Tan F, Zhang H, Ren Z, Luo P. Physiological characterization of stay green wheat cultivars during the grain filling stage under field growing conditions. *Acta Physiol Plant*, 2010, 32: 875–882
- [29] Christopher J T, Manschadi A M, Hammer G, Borrell A K. Developmental and physiological traits associated with high yield and stay-green phenotype in wheat. *Aust J Agric Res*, 2008, 59: 354–364
- [30] Fan T, Balta M, Rudd J, Payne W A. Canopy temperature depression as a potential selection criterion for drought resistance in wheat. *Agric Sci China*, 2005, 4: 793–800
- [31] 吴中伟, 樊高琼, 王秀芳, 郑亭, 陈溢, 李金刚, 郭翔. 不同氮肥用量及其生育期分配比例对四川丘陵区带状种植小麦氮素利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20: 1338–1348
- Wu Z W, Fan G Q, Wang X F, Zheng T, Chen Y, Li J G, Guo X. Effects of nitrogen fertilizer levels and application stages on nitrogen utilization of strip-relay-intercropping wheat in Sichuan Hilly Areas. *J Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20: 1338–1348 (in Chinese with English abstract)
- [32] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 冯倩, 孙丞鸿, 王志伟. 施氮量对晋南旱地冬小麦光合特性、产量及氮素利用的影响. *作物学报*, 2013, 39: 704–711
- Li T L, Xie Y H, Hong J P, Feng Q, Sun C H, Wang Z W. Effects of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics, yield and nitrogen utilization in rainfed winter wheat in southern Shanxi. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 704–711 (in Chinese with English abstract)