

不同氮肥基追比例对高温胁迫下小麦籽粒 产量和品质的影响

刘永环¹, 贺明荣^{1,*}, 王晓英^{1,2}, 张洪华¹

(1. 山东农业大学农学院, 作物生物学国家重点实验室, 泰安 271018, 2. 济宁市农业技术推广站, 山东济宁 272000)

摘要: 选用强筋小麦品种济麦 20、烟农 19、藁麦 8901 做试验材料, 设置不同氮肥基追比例和籽粒灌浆中后期高温胁迫处理, 研究了不同氮肥基追比例对高温胁迫条件下小麦籽粒产量和品质的影响。研究表明, 追氮比例由 50% 增加到 70%, 3 个品种的千粒重、籽粒产量、粗蛋白含量、湿面筋含量、醇溶蛋白含量、谷蛋白含量、HMW-GS 含量、LMW-GS 含量、HMW-GS/LMW-GS 比值显著提高。济麦 20 和烟农 19 的谷蛋白大聚合体含量、谷蛋白大聚合体体积加权平均粒径和表面积加权平均粒径因追氮比例提高而升高, 藁麦 8901 则无显著变化。济麦 20 和烟农 19 的面团形成时间、面团稳定时间因追氮比例提高而延长, 藁麦 8901 基本不受影响。追氮比例由 50% 增加到 70%, 3 个品种的籽粒支链淀粉/直链淀粉比值显著降低, 淀粉糊化高峰黏度、低谷黏度、稀懈值、最终黏度和反弹值相应降低。总之, 提高氮肥追施比例可在一定程度上缓解灌浆期高温胁迫对小麦粒重和蛋白质质量的不利影响, 但对淀粉质量产生负面效应, 且品种间存在差异。

关键词: 小麦; 氮肥; 基追比例; 高温胁迫; 产量; 品质

文章编号: 1000-0933(2009)11-5930-06 中图分类号: Q948 文献标识码: A

The effects of top-dressing to basal nitrogen ratios on grain yield and quality of winter wheat under heat stresses during grain Filling

LIU Yong-Huan¹, HE Ming-Rong^{1,*}, WANG Xiao-Ying^{1,2}, ZHANG Hong-Hua¹

1 Agronomy College, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, China

2 Agricultural Technical Extension Station of Jining City, Shandong Province, Jining 272000, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5930 ~ 5935.

Abstract: In order to investigate the effect of nitrogen regimes on grain yield and quality under heat stresses during grain filling, we investigated three winter wheat cultivars with strong gluten at differential ratio of top-dressing to basal nitrogen fertilization. Three wheat cultivars, Jimai 20, Yannong 19 and Gaomai 8901, were subjected to heat stresses during the last half of grain filling stage. Grain weight, grain yield, and grain quality (protein composition) were carefully examined. Increased ratio of top-dressing to basal nitrogen fertilization generally led to significant increase of 1000-grain weight, grain yield and the content of crude protein, wet gluten, gliadins, glutenins. Meanwhile, higher content of high molecular weight glutenins subunit (HMW-GS), low molecular weight glutenins subunit (LMW-GS) and the ratio of HMW-GS to LMW-GS were also noted. However, the effect of increased ratio of top-dressing to basal nitrogen fertilization on glutenin macropolymer (GMP) content and GMP particle size distribution (weighted average surface area and weighted average volume) was found to be not consistent. While higher ratio of top-dressing to basal nitrogen fertilization elevated the GMP content and weighted average surface area and weighted average volume in Jimai20 and Yannong19, those traits from Gaomai 8901 remained nearly unaffected. Accordingly, similar tendency was observed for both dough development and dough stability time. Increased ratio of top-dressing to basal nitrogen fertilization, from 50% to 70%, resulted in

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT0635); 国家“十一五”科技支撑计划重大资助项目 (2006BAD02A09)

收稿日期: 2008-07-25; 修订日期: 2009-02-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mrhe@sdaa.edu.cn

remarkable decline of the ratio of amylopectin to amylose and peak viscosity, hold through, breakdown, final viscosity and setback of starch. Our findings indicated that higher ratio of top-dressing to basal nitrogen fertilization could alleviate somewhat the adverse effect of heat stresses on grain weight and protein quality (farinograph parameters especially). However, such an improvement was achieved on the cost of worsening starch quality (RVA index), although the degrees of those effects always fluctuates with different cultivars.

Key Words: winter wheat; nitrogen; nitrogen fertilization ratio of base and topdressing; heat stresses; gain yield; grain quality

我国由于受季风的影响,灌浆期高温是我国黄淮海和长江中下游麦区小麦最主要的自然灾害天气之一^[1,2]。小麦籽粒灌浆期是产量及品质形成最密切的生育过程,在高温条件下往往表现灌浆期明显缩短、胚乳内部物质充实不良^[3],最终导致粒重和产量降低;多数研究者认为,高温胁迫直接影响谷蛋白大聚体(GMP)的形成,后期高温胁迫影响单体蛋白间二硫键的形成,改变谷蛋白亚基的聚合度,可溶性谷蛋白聚合体、醇溶蛋白以及球蛋白相对含量显著增加,而不溶性谷蛋白聚合体明显减少,减低了揉面时间,影响了面团的加工品质^[4~8]。另外,高温增加直链淀粉含量^[9],影响面条加工品质。解决热胁迫的途径除了不断地培育优良的耐热品种之外,利用田间的栽培管理措施来尽可能地减轻高温天气的危害也是一条重要的途径。有研究表明,非高温胁迫条件下,在地力较好的土壤,提高氮肥追施比例有利于小麦籽粒产量和蛋白质品质的改善,而且减少氮肥的损失^[10,11],关于提高氮素追施比例对高温胁迫下小麦产量和品质的影响有待进一步明确。因此,本研究设置了不同氮肥基追比和灌浆中后期高温胁迫的试验,旨在阐明氮肥基追比例对灌浆中后期高温胁迫下籽粒产量和品质的调控效应,为生产上通过合理氮肥运筹来减轻高温伤害及建立优质小麦抗逆栽培技术体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验选用济麦 20(J20)、烟农 19(Y19)、藁麦 8901(G8901)3 个强筋冬小麦品种作为供试材料。试验于 2006~2007 年在山东农业大学南校区教学科研基地进行,试验田土壤为壤土。土壤耕层有机质 1.84%,全氮 0.13%,碱解氮 85.9mg/kg,速效磷 22.1mg/kg,速效钾 82mg/kg。设置相同施氮水平下不同氮肥基追比和小麦灌浆期不同温度处理。氮肥(以纯氮计)处理设置为:(1)基肥 112.5 kg/hm² + 追肥 112.5 kg/hm²,即基追比为 50%:50%(N1);(2)基肥 67.5 kg/hm² + 追肥 157.5kg/hm²,即基追比为 30%:70%(N2)。温度设置:(1)灌浆期自然温度(19~34.4℃)(2)灌浆期高温胁迫温度(28.1~40.1℃)(T)。完全随机区组排列,重复 3 次。以普通尿素(含氮 46.4%)为氮源,基肥于播前结合耕翻施入,追肥于拔节期开沟施入。各处理均于播前同时施入磷酸二铵 150kg/hm²(以 P₂O₅ 计)和硫酸钾 105kg/hm²(以 K₂O 计)。增温棚用 0.1mm 厚无色透明无滴薄膜做成,面积与小区面积(3m×3m=9m²)相同,高 1.5m,与小麦冠层之间的距离 50cm 左右,于每天 8:00~18:00 盖棚,花后 18d 盖棚进行高温处理,花后 34d 结束。在此期间有 7d 为阴雨天气,棚内外温度基本无差异,实际高温处理时间为 9d。9d 各时间段温度的平均值如表 1 所示。除温度和氮素因子外,其它田间管理均按高产小麦管理规程进行。

表 1 棚内外温度日变化
Table 1 Daily fluctuation of air temperature inside and outside the plastics channel

温度(℃) Temperature	时间 Time									
	8:30	9:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30
棚外 Outside	19.00	21.41	25.15	27.56	30.20	31.27	34.41	28.70	26.92	23.31
棚内 Inside	28.12	35.00	37.72	38.83	39.20	39.45	40.10	38.07	36.20	30.72

1.2 测定项目与方法

小麦成熟后每小区收获 2m²测产、考种和品质分析。全麦粉采用瑞士 Perten 公司生产的 3100 型试验磨磨制,面粉采用德国 Brabender 公司生产的 Senior 试验磨磨制,细度均为 100 目。

籽粒粗蛋白含量采用 GB2905-1982 谷类、豆类作物种子粗蛋白质测定法(半微量凯氏定氮法)。

面粉湿面筋:采用瑞士 Perten 公司生产的 2200 型面筋洗涤仪,按国标 GB131506-8 测定。

粉质仪参数:采用德国 Brabender 公司产 810106002 型粉质仪,按 AACC 54-21 方法测定。

黏度仪参数:采用澳大利亚 Newport 公司(99-5) (Rapid Viscosity RVA Analyzer) Super 3 型快速粘度仪测定。方法是称取 3.5g 左右面粉(含水量 15%),加水 25ml,混匀后放入黏度仪。

籽粒支、直链淀粉含量:双波长法,参照何照范编著的《粮油籽粒品质及其分析技术》^[12]。

籽粒谷蛋白大聚合体含量测定:参考 Weegels 的方法^[13]。称取 0.05g 小麦面粉,加入 1ml 1.5% 的 SDS 提取液,常温下 15500 × g 离心 15min,弃去上清液,采用双缩脲法测定残余物中氮的含量作为蛋白大聚合体近似含量。

谷蛋白组分测定:参照 Herbert 等的方法^[14],运用反相-高效液相色谱法测定。色谱系统为美国 Waters 公司产 1525 Binary HPLC Pump + 996 photodiode array detector,样品杯体积 1.2ml,工作站软件 Empower。色谱柱为 Nucleosil 300-5 C8 柱(250mm × 4.6 mm)。

谷蛋白大聚合体粒度测定:应用 Beckman Coulter 公司生产 LS13320 型激光衍射粒度分析仪(Laser diffraction particle size analyzer,ULM 模块:Universal Liquid Modules)。参考 Don 等的方法进行^[15]。

试验数据利用 DPS 2003、Excel 2003 等软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥基追比对千粒重和籽粒产量的影响

如表 2 所示,氮肥追施比例由 50% 提高到 70% 时,3 个品种的千粒重和籽粒产量显著增加,但无论是千粒重还是籽粒产量都远低于非高温处理(千粒重:济麦 20 为 35.6g,藁城 8901 为 34.5g,烟农 19 为 32.9g;产量:济麦 20 为 6883kg/hm²,藁城 8901 为 6618.4kg/hm²,烟农 19 为 6649.6kg/hm²)。因此,就粒重和籽粒产量而言,增加追氮比例对灌浆期高温胁迫的缓解效应明显,但仍然显著低于非高温胁迫的粒重和产量,所以缓解的幅度是有限的。

表 2 不同处理的籽粒产量及产量构成因素

Table 2 Grain yield and yield components of different treatments

处理 Treatments		单位面积穗数 Spike number per hm ² (×10 ⁴)	穗粒数 Kernel number per spike	千粒重 Kernel weight (mg·kernel ⁻¹)	籽粒产量 Kernel yield (kg·hm ⁻²)
J20	N1T	736.9a	26.7b	28.5b	5607.2b
	N2T	719.5a	27.0b	31.2a	6060.9a
Y19	N1T	579.0b	29.5a	27.1c	4630.7c
	N2T	581.0b	29.7a	28.3b	4884.9b
G8901	N1T	546.5c	29.4a	27.2c	4370.0d
	N2T	550.8c	29.8a	28.5b	4677.9bc

数据后字母相同者表示 0.05 水平上差异不显著;下同 Means followed by the same letter are not significantly different at $p = 0.05$; The same below

2.2 氮肥基追比对籽粒蛋白质各组分含量及谷蛋白聚合程度的影响

由表 3 可以看出,随着氮肥追施比例的提高,3 个品种的粗蛋白含量、醇溶蛋白含量、谷蛋白含量以及高分子量谷蛋白亚基含量、低分子量谷蛋白亚基含量和高分子量谷蛋白亚基/低分子量谷蛋白亚基比值均显著提高。从而表明,氮肥追施比例的提高不仅利于籽粒蛋白质积累量的增加,而且改善了蛋白质组成。结果济麦 20 和烟农 19 的谷蛋白大聚合体含量和粒度明显变大,而藁城 8901 基本未受影响(表 4)。由此可见,不同

品种对氮肥追施比例变化的响应存在差异。

表 3 不同处理蛋白质及各组分含量
Table 3 The content of crude protein and protein fractions in different treatments

处理 Treatments		粗蛋白含量 Crude protein content (%)	醇溶蛋白含量 Gliadin content (%)	谷蛋白含量 Glutenin content (%)	高分子量谷 蛋白亚基含量 HMW (%)	低分子量谷 蛋白亚基含量 LMW (%)	HMW/LMW
J20	N1T	13.8c	7.1c	4.4c	1.0d	3.2c	0.31d
	N2T	16.1a	8.2a	6.2a	1.6b	4.5a	0.36c
Y19	N1T	13.9c	6.7c	5.8b	1.4c	3.7bc	0.38c
	N2T	16.3a	8.0a	6.8a	1.7b	4.1b	0.41b
G8901	N1T	14.6b	6.8c	5.8b	1.7b	4.0b	0.43b
	N2T	15.8a	7.5b	6.7a	2.1a	4.5a	0.47a

表 4 谷蛋白大聚合体含量与粒度分布
Table 4 Content and size distribution of glutenin macro-polymer

处理 Treatments		谷蛋白大聚合体含量 GMP content (%)	谷蛋白大聚合体粒度 GMP particles Size	
			加权平均表面积 Weighted average surface area	加权平均体积 Weighted average volume
J20	N1T	4.0c	44.2d	11.5c
	N2T	4.4b	56.5a	14.3a
Y19	N1T	4.2c	52.7b	13.0b
	N2T	4.4b	58.2a	14.8a
G8901	N1T	4.6ab	47.6c	13.5b
	N2T	5.1a	50.9bc	14.0ab

2.3 氮肥基追比对籽粒湿面筋含量和面团流变学特性的影响

表 5 显示,3 个品种的湿面筋含量也因氮肥追施比例提高而显着增加,而且济麦 20 和烟农 19 的面团形成时间和面团稳定时间显著延长,意味着其蛋白质质量明显改善。而藁城 8901 的面团形成时间和面团稳定时间受氮肥追施比例变化的影响较小,两氮肥处理间无显着差异。联系到籽粒蛋白质各组分含量及谷蛋白聚合程度的变化情况,可以认为谷蛋白聚合程度对面团流变学特性的影响要大于各蛋白质组分含量。

表 5 不同处理籽粒湿面筋含量和粉质仪指标
Table 5 Wet gluten content and farinograph index of different treatments

处理 Treatments		湿面筋含量 Wet gluten content (%)	吸水率 Water absorption (%)	面团形成时间 Dough development time (min)	面团稳定时间 Dough stability time (min)
J20	N1T	27.9bc	57.4d	2.1d	4.9d
	N2T	29.8a	58.6c	2.9c	7.5b
Y19	N1T	27.4c	60.1b	2.0d	5.5c
	N2T	30.4a	61.9a	3.1b	7.9ab
G8901	N1T	28.1b	61.7a	3.2a	7.8ab
	N2T	29.7a	61.4a	3.5a	8.4a

2.4 氮肥基追比对籽粒淀粉组成和黏度仪指标的影响

氮肥基追比的变化,不仅影响蛋白质组分和质量,而且导致籽粒淀粉组成和黏度仪指标的改变(表 6)。总体趋势是,氮肥追施比例提高,籽粒直链淀粉含量增加,支链淀粉含量和支链淀粉/直链淀粉比例降低。受籽粒淀粉组成变化的影响,淀粉质量相应变差。具体表现为,淀粉糊化高峰黏度、低谷黏度、稀懈值、最终黏度和反弹值相应降低(表 7)。

表 6 不同处理的籽粒淀粉组分

Table 6 Starch composition of different treatments

处理 Treatments		直链淀粉含量 Amylose content (%)	支链淀粉含量 Amylopectin content (%)	支链淀粉/直链淀粉比例 Ratio of amylopectin to amylose
J20	N1T	8.6c	42.0a	4.9a
	N2T	10.0b	36.1d	3.6b
Y19	N1T	8.9c	40.4c	4.5a
	N2T	10.4b	40.6c	3.9b
G8901	N1T	11.1a	41.0b	3.7b
	N2T	11.5a	35.2d	3.1c

表 7 不同处理的淀粉黏度仪指标

Table 7 RVA index of different treatments

处理 Treatments		高峰黏度 Peak Viscosity (RVU)	低谷黏度 Hold through (RVU)	稀懈值 Breakdown (RVU)	最后黏度 Final viscosity (RVU)	反弹值 Setback
J20	N1T	309.7a	209.9a	99.8a	333.3a	123.4a
	N2T	249.9c	162.7d	87.2b	280.1d	117.5b
Y19	N1T	264.9b	182.0c	88.9c	309.8c	125.3a
	N2T	231.4d	156.1e	75.3c	274.6d	118.5b
G8901	N1T	291.0a	195.5b	95.5a	322.6b	127.1a
	N2T	274.5b	186.1bc	88.5b	304.3c	121.3b

3 讨论

有研究表明,高温使得淀粉和蛋白质积累提前结束,缩短了达到最大籽粒含水量和最大籽粒干重的时间^[16,17],高温在短时间内提高籽粒胚乳细胞分裂速率,但胚乳细胞分裂时间明显缩短,减少了胚乳细胞数,显著降低粒重^[18]。本试验结果表明,高温胁迫下增加氮肥追施比例可以提高千粒重,推测原因是由于延缓后期植株衰老,延长了淀粉和蛋白质积累持续时间和胚乳细胞分裂时间,具体生理代谢机制有待进一步研究证明。虽然高温胁迫下增加氮肥追氮比例显著提高籽粒产量,但仍然显著低于非高温胁迫下产量,因此氮肥运筹对高温胁迫负面效应的缓解作用是有限的,合理的种植区划是解决问题的根本之道。

多数研究者认为生育后期温度是影响品质变异的重要环境因素,后期高温胁迫影响单体蛋白间二硫键的形成,改变谷蛋白亚基的聚合度,可溶性谷蛋白聚合体、醇溶蛋白以及清蛋白和球蛋白相对含量显著增加,而不溶性谷蛋白聚合体明显减少,影响面团的加工品质^[4-8]。关于提高氮肥追施比例改善强筋小麦籽粒品质的原因,在非高温胁迫下研究结果表明,提高追肥比例显著提高蛋白质含量,改变各蛋白质组分占总蛋白含量的比例及相互间的比例,改善籽粒品质^[11,19],关于高温胁迫下氮肥基追比籽粒品质影响的研究未见报道。本研究表明,高温胁迫下提高追肥比例不仅显著提高所有蛋白质组分含量,而且使得谷蛋白大聚合体含量和粒度明显提高,相对于谷蛋白大聚合体的含量而言,谷蛋白大聚合体的粒度在改善蛋白质质量方面的作用更大。

灌浆期高温胁迫是导致小麦产量降低、品质变劣的主要生态因子之一,严重影响小麦品质稳定性,如何采取适宜的栽培措施,降低高温危害关系到我国专用小麦高产优质生产的可持续性发展。前人研究表明小麦淀粉积累的形成与蛋白质品质的形成是两个既相互联系又相互独立的过程,高温条件下籽粒蛋白质含量的升高是淀粉积累量减少造成的^[20]。本实验结果表明,在高温条件下,提高氮肥追施比例提高蛋白质质量的同时降低淀粉质量,影响面条加工品质;在氮肥用量相同的情况下,将拔节期追施氮肥的比例由生产中常见的 50% 提高到 70%,可在一定程度上减缓灌浆中后期高温胁迫对粒重、蛋白质质量和产量的不利影响,对提高产量和改善面团品质具有积极的作用。

References:

- [1] Jing Q, Cao W X, Dai T B. Progress on the study of cause and control on wheat grain quality. Triticeae Crops, 1999, 19 (4): 46—50.

- [2] Dai T B, Zhao H, Jing Q, *et al.* Effects of high temperature and water stress during grain filling on grain protein and starch formation in winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3670—3676.
- [3] Liu P, Guo W S, Pu H C, *et al.* Effects of Transient High Temperature during Grain Filling Period on Starch Formation in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2): 182—188.
- [4] Blumenthal C S, Bekes F, Gras P W, *et al.* Identification of wheat genotypes tolerant to the effects of heat stress on grain quality. *Cereal Chem.*, 1995, 72: 539—544.
- [5] Gupta R B, Masci S, Lafiandra D, *et al.* Accumulation of protein subunits and their polymers in developing grains of hexaploid wheats. *J. Experi. Bot.*, 1996, 47: 1377—1385.
- [6] Naeem H A, MacRitchie F. Heat stress effects on wheat proteins during grain development. *Proceedings of 10th International Wheat Genetics Symposium*. 1—6 September, Poestum, Italy. 2003. 455—458.
- [7] Ciaffi M, Tozzi L, Borghi B, *et al.* Effects of heat shock during grain filling on the gluten protein composition of bread wheat. *J. Cereal Sci.*, 1996, 24: 91—100.
- [8] Corbellini M, Mazza L, Ciaffi M, *et al.* Effect of heat shock during grain filling on protein composition and technological quality of wheats. *Euphytica*, 1998, 100: 147—154.
- [9] Hurkman W J, McCue K F, Altenbach S B, *et al.* Effect of temperature on expression of genes encoding enzymes for starch biosyntheses in developing wheat endosperm. *Plant Sci*, 2003, 164: 873—881.
- [10] 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. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(12): 1860—1866.
- [11] Dai T B, Sun C F, Jing Q, *et al.* Regulation of nitrogen rates and dressing ratios on grain quality in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(2): 248—253.
- [12] He Z F. *Grain Quality and Its Analysis Technology*. Beijing: Agriculture Press, 1985.
- [13] Weegels P L, Van De Pijpekamp A M, Graveland A, *et al.* Depolymerisation and repolymerisation of wheat gluten during dough processing 1. Relationships between GMP content and quality parameters. *Journal of Cereal Science*, 1996, 23: 103—111.
- [14] Herbert W, Susanne A, Werner S. Quantitative determination of gluten protein types in wheat flour by reversed-phase high-performance liquid chromatography. *Cereal Chemistry*, 1998, 75(5): 644—650.
- [15] Don C, Lichtendonk W, Plijter J J, *et al.* Understanding the link between GMP and dough: from glutenin particles in flour towards developed dough. *Journal of Cereal Science*, 2003, 38: 157—165.
- [16] Li Y G, Jiang G M, Yang J C. Effects of temperature on carbon and nitrogen metabolism, yield and quality of wheat. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, 27(2): 164—169.
- [17] Altenbach S B, Dupont F M, Kothari K M, *et al.* Temperature, water and fertilizer influence the timing of key events during grain development in a US spring wheat. *J. Cereal Sci.*, 2003, 37: 9—20.
- [18] Feng C N, Guo W S, Shi J S, *et al.* Effect of high temperature after anthesis on endosperm cell development and grain weight in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(4): 399—405.
- [19] Jia Y Q, Fabre J L, Aussence T. Effects of growing location on response of protein polymerization to increased nitrogen fertilization for the common wheat cultivar Soisson: Relationship with some aspects of the breadmaking quality. *Cereal Chemistry*, 1996, 73(5): 526—532.
- [20] Li Y G, Yu Z W, Zhang X J, *et al.* Response of yield and quality of wheat to heat stress at different grain filling stages. *Acta Phytoecol Sin*, 2005, 29(3): 461—466.

参考文献:

- [1] 荆奇, 曹卫星, 戴廷波. 小麦籽粒品质形成及调控研究进展. *麦类作物*, 1999, 19(4): 46—50.
- [2] 戴廷波, 赵辉, 荆奇, 等. 灌浆期高温和水分逆境对冬小麦籽粒蛋白质和淀粉含量的影响. *生态学报*, 2006, 26(11): 3670—3675.
- [3] 刘萍, 郭文善, 浦汉春, 等. 灌浆期短暂高温对小麦淀粉形成的影响. *作物学报*, 2006, 32(2): 182—188.
- [10] 石玉, 于振文. 施氮量及底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响. *作物学报*, 2006, 32(12): 1860—1866.
- [11] 戴廷波, 孙传范, 荆奇, 等. 不同施氮水平和基追比对小麦籽粒品质形成的调控. *作物学报*, 2005, 31(2): 248—253.
- [12] 何照范. *粮油籽粒品质及其分析技术*. 北京: 农业出版社, 1985.
- [16] 李永庚, 蒋高明, 杨景成. 温度对小麦碳氮代谢、产量及品质的影响. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 164—169.
- [18] 封超年, 郭文善, 施劲松, 等. 小麦花后高温对籽粒胚乳细胞发育及粒重的影响. *作物学报*, 2000, 26(4): 399—405.
- [20] 李永庚, 于振文, 张秀杰, 等. 小麦产量与品质对灌浆不同阶段高温胁迫的响应. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 461—466.