

# 小黑麦性能的影响因素

赵娜<sup>1,2</sup> 赵新全<sup>1,2,3</sup> 赵亮<sup>1,2</sup> 徐世晓<sup>1,2\*</sup> 邹小艳<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海西宁 810008; 2. 中国科学院西北高原生物研究所海北高寒生态系统研究站, 高原生物适应与进化重点实验室, 青海西宁 810008; 3. 中国科学院成都生物研究所, 四川成都 610041)

**摘要** 综述小黑麦产量和品质方面潜在的生理学和酶学机理, 同时探讨不同农艺措施对小黑麦产量和品质的影响, 为进一步挖掘小黑麦的潜能提供借鉴。

**关键词** 小黑麦; 产量; 品质; 群体密度; 氮肥

中图分类号 S512.5; Q945 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2015)28-009-04

DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2015.28.004

**Influence Factors on Triticale Performance**

ZHAO Na<sup>1,2</sup>, ZHAO Xin-quan<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Liang<sup>1,2</sup>, XU Shi-xiao<sup>1,2\*</sup> et al (1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008; 2. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station, Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008; 3. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041)

**Abstract** The physiological and enzymological mechanisms about triticale yield and quality were summarized in this paper, and the effects of different agronomic measures on triticale yield and quality were explored, which could provide some references to further excavate the potential of triticale.

**Key words** Triticale; Yield; Quality; Population density; Nitrogen fertilizer

小黑麦是第一个通过染色体加倍培育出的人工异源多倍体新物种<sup>[1]</sup>。它结合了小麦的丰产、营养生长繁茂、黑麦的抗病、抗逆以及蛋白质平衡和赖氨酸含量高等特点<sup>[2-3]</sup>。小黑麦这些超越双亲的优良特性不仅直接决定小黑麦的营养价值, 而且影响其烘烤加工性能。不同品系小黑麦的产量和品质存在很大的变异<sup>[4]</sup>。然而通过栽培措施来弥补小黑麦性能的降低已成为可能<sup>[5]</sup>。但是, 目前在小黑麦的播种期管理、栽培和施肥技术等方面存在一些“瓶颈”, 制约着小黑麦生产的迅速发展。探索小黑麦产量和品质调优栽培技术, 保持其籽粒黑色优质营养等优势, 使之在农业生产和饲料应用中发挥更大的作用, 在营养特色的保持方面提供栽培上的参考。综合中国各地推广应用小黑麦的栽培技术, 可知大部分地区充分利用小黑麦耐贫瘠、抗性好的特点<sup>[6]</sup>, 但有关小黑麦的具体栽培、调控措施仍未引起足够的重视, 栽培措施与小麦相比显得粗放, 不利于其增产潜力的挖掘, 其品质的栽培改良也有待进一步深入。该研究综述了小黑麦产量和品质方面潜在的生理学和酶学机理, 最终通过建立合理的群体密度、适宜的收获时节和合理的氮素营养水平来优化其自身结构, 为进一步深化以及拓展小黑麦的应用提供一些借鉴。

## 1 小黑麦产量的内在决定因素

小黑麦的产量潜能对于其产量表现具有重要的影响。在中度干扰下, 产量一般保持在其产量潜能的 50% ~ 70%<sup>[7]</sup>。如果干扰继续加强, 那么小黑麦会启动特定的抵抗基因表达来维持其高产。一般来说, 处于生长季光照和温度

均适宜的条件下, 小黑麦比普通小麦和硬粒小麦具有更高的生物量和产量, 但当花期条件不适应时, 小黑麦的谷物产量降低<sup>[8]</sup>。通过在匈牙利开展的大量品种测验, 发现在极端环境下, 特别在干旱和土壤贫瘠时, 小黑麦的产量优势往往优于小麦<sup>[9]</sup>, 一般总比小麦增产约 17 个百分点<sup>[10-11]</sup>。另有研究指出, 小黑麦生物量和谷物产量主要取决于其自身冠层对光能的捕获, 从而体现出高的有效光辐射利用率<sup>[12-13]</sup>。然而, 有效光辐射利用率更多依赖于冠层的功能而非光能捕获。这方面的研究有待进一步深入。另外, 不同品种间气孔导度和同化作用也存在大量差异。叶片气孔的调节决定光合叶片 CO<sub>2</sub> 的扩散率以及叶片呼吸时水分的损失率, 是植物适应特定环境的结果<sup>[14]</sup>。高产基因型小黑麦往往表现出更高的气孔导度和气体交换<sup>[8, 15-21]</sup>。高的气孔导度标志着水分利用和光辐射利用效率方面的优势<sup>[12, 14, 22]</sup>。Winzeler 等<sup>[23]</sup>通过小黑麦、黑麦和普通小麦的对比试验, 发现小黑麦和黑麦的生长速率明显高于普通小麦, 而且较小麦具有更高的气孔导度和更低的叶片呼吸。这种规律在低温条件下表现更加明显, 进一步证实在低温条件下小黑麦的产量优势。而且, 小黑麦叶片具有更高的 Rubisco 含量、羧酶活性<sup>[24]</sup>以及独特的角质层蜡质含量和结构。叶片角质层蜡质成分表现出对 UV-B 辐射极大的耐受性以及更高的反射率<sup>[25]</sup>, 有效地降低植物的能量负荷, 进而在一定程度上抑制叶片的呼吸作用。Saulescu 等<sup>[26]</sup>指出, 小黑麦所具有较高的气孔和冠层导度、较高的光能有效利用率、较高的叶片反射率以及较低的呼吸速率能够在一定程度上解释小黑麦的产量优势。总之, 小黑麦通过丰富的生理学变异来提高其自身产量<sup>[4]</sup>。

## 2 群体大小对小黑麦产量和品质的影响

小黑麦群体质量是建立在自出苗至孕穗期各生育时期群体合理发展的基础上, 通过提高茎秆成穗率达到茎秆动态平衡, 最终实现合理成穗的过程。一般, 最高茎秆数出

基金项目 国家自然科学基金项目(31402120); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070200); 青海省科技支撑项目(2013-N-146-3); 国家科技支撑计划(2012BAD13B01)。

作者简介 赵娜(1980-), 女, 山西浑源人, 助理研究员, 博士, 从事草地生态及恢复等方面的研究。\* 通讯作者, 研究员, 博士, 从事生态恢复方面的研究。

收稿日期 2015-08-22

现在拔节期,拔节后由于受营养物质分配的限制,营养枝生长减弱,分蘖减少,营养枝分化加强,向两极分化的晚蘖和小蘖死亡,总茎数减少,通过控制拔节前无效分蘖的发生,降低高峰茎蘖与最终穗数的比值,提高茎蘖成穗率。合理密度的确定至关重要。群体规模过大会导致中后期群体早衰、个体发育不良及倒伏现象,阻碍高产<sup>[27]</sup>;而低密度处理个体发育虽好,但群体数量明显降低,田间蒸发量大,水分亏缺多,影响个体优势的发挥<sup>[28]</sup>。李陶<sup>[29]</sup>发现,小黑麦营养期总茎数随密度增加而增加,但成熟期成穗率随密度增加而降低,虽然在高密度下总茎数增大,但是由于个体发育不良,限制生育后期的光合能力,降低茎蘖成穗率。小黑麦产量的提高与单位面积穗数的增加有密切关系。通过单位穗数的总结实粒数来实现产量的增加,特别在高寒山区和土壤贫瘠地区,这种关系更加明显。小黑麦种植大多集中在中国西部高寒山区和北方寒冷地区。由于受生产条件的限制,群体、个体生长量不足,单位面积穗数偏少,产量低,故生产中应注意合理密植。在正常情况下,种植密度是麦类作物栽培措施中与分蘖发生、成穗关系最为密切的农艺措施<sup>[30-32]</sup>。根据不同的功能和目的,小黑麦的种植密度存在较大差异。以收获青草为主的饲用型小黑麦种植密度一般要高于粮用类型。有研究认为,粮用型小黑麦最佳种植密度为180万株/hm<sup>2</sup>,饲用型小黑麦播种密度以210万株/hm<sup>2</sup>为好<sup>[33]</sup>。基本苗数是创造合理群体的基础。种植密度影响麦类作物生长发育状况、产量和品质性状的原因在于对植株光合作用的影响<sup>[34]</sup>。光合作用是植物重要的基本代谢过程,是产量形成的基础。光合作用的大小受到叶绿素和光合速率等因素的制约。叶绿素含量的高低表明光合能力的强弱,也是叶片衰老程度的一个重要指标<sup>[27]</sup>。近年来,我国一些学者初步研究了群体大小对小黑麦光合特性的影响。魏亦农等<sup>[35-37]</sup>发现,在生育前期各密度处理下叶绿素含量差别不大,随着生育进程的推迟,随着密度的增加,叶绿素含量呈下降趋势,到花后28d表现尤为明显。建立合理的群体结构,能有效地提高小黑麦开花后植株的生理活性,延长叶片衰老速度,加强同化物的合成作用,扩大籽粒库容,并增强籽粒的充实能力,提高粒重。高密度和低密度均不利于旗叶光合速率的提高。旗叶光合速率的高低对保持较长光合产物的积累也具有重要意义<sup>[38]</sup>。适宜的群体大小也有利于提高小黑麦叶面积指数和群体光合势,有利于后期群体光合能力的提高和保持,增加群体干物质积累,提高籽粒产量<sup>[39]</sup>。群体密度影响叶片中硝酸还原酶、谷胺酰胺合成酶和蛋白水解酶活性。这3种酶作为氮代谢的关键酶,参与多种氮代谢调节<sup>[40-41]</sup>。随着种植密度的增加,叶片中硝酸还原酶和谷胺酰胺合成酶活性呈下降趋势,不利于蛋白质的合成同化。正如试验中观察到的,籽粒蛋白质含量随群体密度的增加而呈下降趋势。同时,参与蛋白质降解作用的蛋白水解酶(内肽酶和氨肽酶)的活性随群体密度增加而增加,加强蛋白质的降解能力,加速叶片的早衰<sup>[42]</sup>。所以,高密度不利于小黑麦籽粒蛋白质含量的提高<sup>[27]</sup>。另外,小黑麦产量和品质的密度效应还受品

种特性和生态类型等诸多因素的制约,因而不同研究结果存在一定差异。根据不同的地理条件、气候特点,摸索出小黑麦的最佳播种密度极为关键。建立适合各区域生态环境的小黑麦品种栽培推广技术,以点带面,推动草畜联动可持续发展。

### 3 氮素对小黑麦产量和品质的影响

正如禾本科、灯芯草科和莎草科属植物长期表现出对氮素的高度选择性吸收一样<sup>[43]</sup>,小黑麦的产量、品质受到氮肥的支配<sup>[44]</sup>。氮素是蛋白质、核酸、叶绿素的组成元素之一,是影响小黑麦品质和产量提高最活跃的关键因素<sup>[45]</sup>。施氮一方面提高了光能转换效率和PSII的潜在活性,另一方面抑制了光能的非光化学耗散。适当增施氮肥能提高叶面积指数,增加叶绿素含量和花后净光合速率,降低花后胞间CO<sub>2</sub>浓度,促使植株生育期延长,延缓叶片衰老,延长上部功能叶持续时间,充分发挥叶片的光合潜能<sup>[46]</sup>,加强小黑麦的生理活性和新陈代谢能力,促进营养物质的积累,有利于花、籽粒等生殖器官的发育和生长<sup>[47]</sup>。施氮可提高小黑麦灌浆中期的维管束数目、穗下节的长度和直径,促进拔节期后的干物质积累,提高饲草产量。董永琴等指出,追氮65 kg/hm<sup>2</sup>能提高有效穗数、穗粒数、千粒重<sup>[48]</sup>。也有研究指出,在氮浓度为75 kg/hm<sup>2</sup>处理时茎蘖成穗率和产量最高,并且具有较好的饲用品质<sup>[49]</sup>。同时,分基施、追施2次施氮可有效延长绿叶生长期,增加叶片光合持续时间,维持花后旗叶气孔导度,促进小黑麦灌浆中期营养物质由鞘、茎向籽粒转移,最终促进小黑麦高产<sup>[46,50-51]</sup>。有研究表明,最有效的肥料利用方式为播种时少量增施氮肥,在保证一定的基肥基础上,分蘖期适当追加氮肥能有效地提高小黑麦产量<sup>[52-53]</sup>。过量施氮对小黑麦光合性能的提高并没有帮助,光合能力并不随施氮量呈同比例的改善。施氮量过多会导致中期群体偏大,茎蘖成穗率降低,进而减产。

有关氮素对小黑麦籽粒产量、蛋白品质的影响,国内外已经开展的大量工作<sup>[54-57]</sup>。施加氮素直接促进氮代谢和同化,有利于氨基酸合成,促进植物的光合作用,提高氮素在植物体内的运转<sup>[58]</sup>。然而,氮素对植物营养体干物质的积累作用远远高于其对籽粒本身氮的沉积作用<sup>[59-60]</sup>。提高小黑麦营养体的干物质积累及贮存氮素的转运效率,是高产优质小黑麦形成的生理基础。花前同化对于谷物产量的贡献占春小黑麦基因型的46%,占晚花冬小黑麦基因型的65%。小黑麦茎部的贮藏利用对于其籽粒填充至关重要,特别是在胁迫环境中<sup>[61]</sup>。花前茎秆贮藏物质的积累使得大量的贮藏同化物通过运转分配到谷物灌浆期<sup>[8,62-63]</sup>,最终导致后期籽粒产量的提高。另外,适量增施氮肥也是提高小黑麦籽粒氮含量、降低中性洗涤纤维(NDF)、有效改善加工品质的有效措施<sup>[52-53,63]</sup>。花前营养器官中氮素的积累和运转再分配是提高籽粒蛋白组分含量的关键因素<sup>[60,64]</sup>。在籽粒蛋白积累的两条路径中,花前植株贮藏氮素的再运转作用远远大于其开花后籽粒直接吸收的氮,在营养生长阶段营养器官中合成的蛋白质,花后降解成游离氨基酸,绝大多数转运到籽粒中,

直接或间接地形成籽粒蛋白质。有研究表明,在整个生长发育时期,花前植物营养器官向籽粒运输氮素营养占籽粒全部氮含量的 53.0% ~ 80.5%<sup>[65-66]</sup>。赵万春<sup>[67]</sup>也发现,植株氮含量与籽粒氮含量呈显著的正相关,同时拔节期的植株氮含量可以预测成熟期籽粒氮含量的高低。总之,花前营养器官充足氮含量成为高蛋白籽粒的基础。另有研究指出,花后冠层的延迟衰老对于谷物蛋白含量的提高也起到积极的促进作用<sup>[68]</sup>。籽粒发育过程的前 5 ~ 6 周的氮素积累在整个籽粒蛋白形成过程中占一半以上<sup>[69]</sup>。因此,在氮肥管理中应重视调动花前期营养器官氮素向籽粒中的转运,并且相应加强中后期的氮肥调控,延缓植株衰老,达到较高的氮素利用效率<sup>[70]</sup>。

然而,在目前生产上,为盲目实现作物产量的提高和品质的改善,过量施氮的现象在我国普遍存在<sup>[71]</sup>。氮肥的平均利用效率不足 30%<sup>[72]</sup>。这不仅造成资源的浪费,而且施入土壤中的过量氮肥带来诸多环境问题<sup>[73-74]</sup>。近年来,随着畜牧业的发展,规模化的饲草种植越来越受到重视,关于小黑麦的研究报道也越来越多<sup>[75-76]</sup>。如何通过自身基因改良和外界农艺措施进一步提高小黑麦的产量和品质,是作物学家亟需解决的问题。小黑麦作为小麦和黑麦经属间杂交人类创造的第一个新物种,经过近一个半世纪的努力后已成为集经济、生态和饲用价值为一身的麦类作物,被广泛应用于粮食、饲料和工业生产中,其发展前景不可限量<sup>[63]</sup>。

#### 参考文献

- ZILLINSKY F J. The development of triticale [J]. *Adv Agron*, 1974, 26: 315.
- ANNICK M M, PRADIER E, TREMBLIN G. Osmotic adjustment, gas exchanges and chlorophyll fluorescence of a hexaploid triticale and its parental species under salt stress [J]. *J Plant Physiol*, 2004, 161: 25-33.
- 王金玲, 董心久, 田成军, 等. 水分胁迫对小黑麦生理生化特性和可溶性蛋白质的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(5): 137-139.
- BLUM A. The abiotic stress response and adaptation of triticale-A review [J]. *Cereal research communications*, 2014, 42(3): 359-375.
- 李焰焰, 董召荣, 聂传朋, 等. 盐胁迫下水杨酸及其衍生物对小黑麦幼苗生理特性的影响 [J]. *生物学杂志*, 2005, 22(3): 11-13.
- 时丽冉, 吕亚慈, 刘贵波, 等. 不同小黑麦品种萌发期抗盐性的比较 [J]. *种子*, 2008, 27(10): 101-103.
- BLUM A. Drought resistance, water-use efficiency and yield potential—are they compatible, dissonant or mutually exclusive [J]. *Aust J Agric Res*, 2005, 56: 1159-1168.
- MOTZO R, PRUNEDDU G, GIUNTA F. The role of stomatal conductance for water and radiation use efficiency of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment [J]. *Europ J Agron*, 2013, 44: 87-97.
- BONA L. Triticale in Hungary [M] // MERGOM M, GÓMEZ-MACPHERSON H. *Triticale Improvement and Production*. FAO Plant Production and Protection Paper no. 179. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004: 119-122.
- EHDAIE B, SHAKIBA M, WAINES J. Sowing date and nitrogen input influence nitrogen-use efficiency in spring bread and durum wheat genotypes [J]. *Journal of plant nutrition*, 2001, 24: 899-919.
- GIUNTA F, MOTZO R, PRUNEDDU G. Comparison of temperate cereals and grain legumes in a Mediterranean environment [J]. *Agricultural medicine*, 2003, 133: 234-248.
- GIUNTA F, PRUNEDDU G, MOTZO R. Radiation interception and biomass and nitrogen accumulation in different cereal and grain legume species [J]. *Field crops research*, 2009, 110: 76-84.
- ESTRADA-CAMPUZANO G, SLAFER G A, MIRALLES D J. Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments [J]. *Field Crops Res*, 2012, 128: 167-179.
- JONES H G. *Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology* [M]. second ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- FISCHER R A, REES D, SAYRE K D, et al. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate and cooler canopies [J]. *Crop Sci*, 1998, 38: 1467-1475.
- CONDON A G, RICHARDS R A, REBETZKE G J, et al. Improving intrinsic water-use efficiency and crop yield [J]. *Crop science*, 2002, 42: 122-131.
- HORIE T, SHOJI M, TOSHIYUKI T, et al. Genotypic difference in canopy diffusive conductance measured by a new remote-sensing method and its association with the difference in rice yield potential [J]. *Plant cell environment*, 2006, 29: 653-660.
- BLUM A. *Plant breeding for water limited environments* [M]. New York, USA: Springer, 2011: 258.
- REYNOLDS M P, PASK A J D, MULLAN D M. *Physiological breeding [M] // Interdisciplinary Approaches to Improve Crop Adaptation*. CIMMYT Mexico, D F, 2012.
- BLUM A. Heterosis, stress and the environment: A possible road map towards the general improvement of crop yield [J]. *J Exp Bot*, 2013, 64: 4829-4837.
- WANG Y, NOGUCHI K, ONO N, et al. Overexpression of plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase in guard cells promotes light-induced stomatal opening and enhances plant growth [J]. *Proc Nat Acad Sci*, 2014, 111: 533-538.
- CONDON A G, REYNOLDS M P, BRENNAN J, et al. Stomatal aperture related traits and yield potential in bread wheat [M] // REYNOLDS M P, PIETRAGALLA J, BROWN H J. *International Symposium on Wheat Yield Potential: Challenges to International Wheat Breeding*. Mexico, D F: CIMMYT, 2008: 126-133.
- WINZELER M, MCCULLOUGH D E, HUNT L A. Leaf gas exchange and plant growth of winter rye, triticale and wheat under contrasting temperature regimes [J]. *Crop Sci*, 1989, 29: 1256-1260.
- SINGH B, SINGH B K. Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase content and activity in wheat, rye and triticale [J]. *Biol Plant*, 2001, 44: 427-430.
- SKÓRSKA E, SZWARC W. Influence of UV-B radiation on young triticale plants with different wax cover [J]. *Biol Plant*, 2007, 51: 189-192.
- SAULESCU N N, ITTU G, CIUCA M, et al. Transferring useful rye genes to wheat using triticale as a bridge [J]. *Czech J Genet Plant Breed*, 2011, 47: S56-S62.
- 张永丽, 蓝岚, 李雁鸣. 种植密度对杂种小麦 C6-38 / Py85-1 群体生长和子粒产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2008, 28(1): 113-116.
- 王长年. 高肥条件下密度对济南 17 小麦群体质量和产量的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2002(1): 18-19.
- 李陶. 密度和氮素营养对小黑麦产量及品质的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.
- 曹承富, 汪芝寿, 孔令聪, 等. 氮素与密度对优质小麦产量和品质的影响 [J]. *安徽农业科学*, 1997, 25(2): 115-117.
- 孙元枢, 谢运, 王钧睦. 新饲料作物: 小黑麦 [J]. *牧草与饲料*, 1991(4): 37-40.
- GIUNTA F, MOTZO R. Sowing rate and cultivar affect total biomass and grain yield of spring triticale (×Triticosecale Wittmack) grown in a Mediterranean-type environment [J]. *Field crops research*, 2004, 87(2/3): 179-193.
- 董永琴, 郭春英, 王华芬. 不同播种量对小黑麦不同品种的影响 [J]. *贵州农业科学*, 1988(1): 17-22.
- 王萍, 陶丹, 宋海星, 等. 品种、播期和密度对冬小麦生育后期和产量的影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 1999, 30(6): 602-605.
- 魏亦农, 孔广超, 曹连莆. 新小黑麦 1 号光合速率及叶绿素荧光特性的研究 [J]. *麦类作物学报*, 2002, 22(4): 91-93.
- 魏亦农, 孔广超, 曹连莆. 干旱胁迫对春小麦与小黑麦光合特性影响的比较 [J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(3): 134-136.
- 魏亦农. 小黑麦不同基因型光合特性的比较 [J]. *种子*, 2004, 23(9): 39-40.
- 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮麦区冬小麦超高产栽培的理论与实践 [J]. *作物学报*, 2002, 28(5): 577-585.
- 姚国才. 不同密度和施氮量对宁麦 8 号产量及其构成因素的影响 [J]. *江苏农业科学*, 1998(3): 7-8.
- LI C F, MA F M, ZHAO Y, et al. Effects of nitrogen forms on key enzyme activities and related products in sugar and nitrogen metabolism of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) [J]. *Acta Agron Sin*, 2003, 29(1): 128-132.

- [41] MA X M, LI L, ZHAO P et al. Effect of water control on activities of nitrogen assimilation enzymes and grain quality in winter wheat [J]. *Acta Phytoecol Sin* 2005 29(1): 48-53.
- [42] 高玲, 叶茂炳, 张荣铎. 小麦旗叶衰老期间的内肽酶 [J]. *植物生理学学报* 1998 24(2): 183-188.
- [43] WOLLENWEBER B, KINZEL H. Role of carboxylate in the nitrogen metabolism of plants from different natural habitats [J]. *Physiologia plantarum* 1988 72: 321-328.
- [44] JORGENSEN J R, DELEURAN L C, WOLLENWEBER B. Prospects of whole grain crops of wheat, rye and triticale under different fertilizer regimes for energy production [J]. *Biomass bioenergy* 2007 31: 308-317.
- [45] 彭永欣, 姜雪忠, 郭文善等. 氮素对小麦籽粒产量、粒重及容重的调节效应 [C] // 凌启鸿. 稻麦研究新进展. 南京: 东南大学出版社, 1991: 182.
- [46] 李焰焰, 葛传朋, 董召荣. 氮肥对小黑麦中饲 237 光合特性的影响 [J]. *作物杂志* 2006(6): 68-70.
- [47] 孙元枢, 曹连莆, 武锦祥等. 中国小黑麦遗传育种研究与应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2002.
- [48] 董永琴, 英敏, 郭春英. 八倍体小黑麦新品种不同追氮量试验 [J]. *贵州农业科学* 1993(1): 21-24.
- [49] 李晶, 祖伟, 吉彪. 氮用量对小黑麦 (triticale) 东农 96026 群体生长及饲用品质的影响 [J]. *中国农学通报* 2009 25(7): 141-144.
- [50] KARA B, JYSAI N. Influence on grain yield and grain protein content of late-season nitrogen application in triticale [J]. *J Anim Vet Adv* 2009 8: 579-586.
- [51] CASSMAN K G, BRYANT D C, FULTON A E. Nitrogen supply effects on partitioning of dry matter and nitrogen to grain of irrigated wheat [J]. *Crop Sci* 1992 32: 1251-1258.
- [52] HARMONEY K R, THOMPSON C A. Fertilizer rate and placement alters triticale forage yield and quality [J]. *Forage and grazinglands* 2005 5: 1-9.
- [53] GIBSON L R, NANCE C D, KARLEN D L. Winter triticale response to nitrogen fertilization when grown after corn or soybean [J]. *Agronomy journal* 2007 99: 49-58.
- [54] SINGH A K, JAIN G L. Effect of sowing time, irrigation and nitrogen on grain yield and quality of durum wheat (*Triticum durum*) [J]. *Indian J Agric Sci* 2000 70(8): 532-533.
- [55] HUSSAIN M L, SHAN S H, SAJJAD H et al. Growth, yield and quality response of three wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties to different levels of N, P and K [J]. *Int J Agric Biol* 2002 4(3): 362-364.
- [56] SANJEEV K, RAJENDER K, HARBIR S. Influence of time sowing and NP fertilization on grain quality of macaroni wheat (*Triticum durum*) [J]. *Haryana Agric Univ J Res* 2002 32(1): 31-33.
- [57] 张锡洲, 吴沂珀, 李廷轩. 不同施氮水平下不同氮利用效率小黑麦植株氮素积累分配特性 [J]. *中国生态农业学报* 2014 22(2): 151-158.
- [58] 宋建民, 田纪春, 赵世杰. 植物光合氮和氮代谢之间的关系及其调节 [J]. *植物生理学通讯* 1998 34(3): 230-238.
- [59] EHDAIE B, WAINES J G. Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat [J]. *Field crops research* 2001 73: 47-61.
- [60] ISFAN D. Genotypic variability for physiological efficiency index of nitrogen in oats [J]. *Plant soil* 1993 154: 53-59.
- [61] ROYO C, VOLTAS J, ROMAGOSA I. Remobilization of pre-anthesis assimilates to the grain for grain only and dual-purpose (forage and grain) triticale [J]. *Crop Sci* 1999 91: 312-316.
- [62] GIUNTA F, MOTZO R, DEIDDA M. Effects of drought on leaf area development, biomass production and nitrogen uptake of durum wheat grown in a Mediterranean environment [J]. *Australian journal of agricultural research* 1995 46: 99-111.
- [63] MCGOVERIN C M, SNYDERS F, MULLER N et al. A review of triticale uses and the effect of growth environment on grain quality [J]. *J Sci Food Agric* 2011 91: 1155-1165.
- [64] WILLIAMS R F. Redistribution of mineral elements during development [J]. *Annu Rev Plant Phys* 1955 6: 25-42.
- [65] PALTA J A, KOBATA T, TURNER N C et al. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficit [J]. *Crop Science* 1994 34: 118-124.
- [66] 王月福, 于振文, 李尚霞等. 土壤肥力和施氮量对小麦氮素吸收运转及籽粒产量和蛋白质含量的影响 [J]. *应用生态学报* 2003 14(11): 1868-1872.
- [67] 赵万春. 小麦组织氮的积累与分配及其相关性研究 [J]. *西北农业大学学报* 1999 27(6): 38-42.
- [68] THOMAS H, HOWARTH C J. Five ways to stay green [J]. *J Exp Bot* 2000 51: 329-337.
- [69] AUSTIN A, NAIR T V R. The contribution of individual plant parts to the nitrogen content of wheat grain [J]. *Indian Journal Plant Phys* 1963 6: 166-172.
- [70] 孙传范. 小麦氮素利用效率的生理生态与氮肥调控研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2002.
- [71] 闫湘, 金继运, 何萍. 提高肥料利用率技术研究进展 [J]. *中国农业科技* 2008 41(2): 450-459.
- [72] 张亚丽. 水稻氮效率基因型差异评价与氮高效机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [73] FAO. Statistical databases [Z]. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations 2004.
- [74] MIKHAIL A S, PETER D J, PIERRE M. Deconvoluting nitrogen use efficiency in wheat: A simulation study [J]. *European journal of agronomy* 2007 26: 283-294.
- [75] 黄婷, 董召荣, 夏琦等. 秸秆覆盖与镇压对小黑麦生长状况的影响 [J]. *干旱地农业研究* 2011 29(6): 92-96.
- [76] 曹连莆, 任丽彤, 孔广超等. 小黑麦萌发期耐盐性评价 [J]. *麦类作物学报* 2012 32(5): 1-6.

(上接第 8 页)

#### 参考文献

- [1] LORENZ R T, CYSEWSKI G R. Commercial potential for *Haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin [J]. *Tibtech Appl* 2000 18: 160-167.
- [2] MIAO F P, LU D Y, LI Y G et al. Characterization of astaxanthin esters in *Haematococcus pluvialis* by liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry [J]. *Analytical biochemistry* 2006, 352(2): 176-181.
- [3] 孟春晓, 高政权, 王依涛等. 雨生红球藻中虾青素提取方法研究现状 [J]. *水产科学* 2010 29(12): 745-748.
- [4] 邱昌恩. 6-BA 对平菇和香菇菌丝体两种同工酶的影响 [J]. *微生物学杂志* 2002 22(4): 89-92.
- [5] 王秀奇, 秦淑媛, 高天慧等. 基础生物化学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 227-232.
- [6] 季维智, 宿兵. 遗传多样性研究的原理与方法 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1999: 52-68.
- [7] KANG C D, SIM S J. Direct extraction of astaxanthin from *Haematococcus* culture using vegetable oils [J]. *Biotechnology letters* 2008 30(3): 441-444.
- [8] KRICHNAVARUK S, SHOTIPRUK A, GOTO M et al. Supercritical carbon dioxide extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* with vegetable oils as co-solvent [J]. *Bioresource technology* 2008 99(13): 5556-5560.
- [9] MACHMUDAH S, SHOTIPRUK A, GOTO M et al. Extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* using supercritical CO<sub>2</sub> and ethanol as entrainer [J]. *Industrial & engineering chemistry research* 2006 45(10): 3652-3657.
- [10] NOBRE B, MARCELO F, PASSOS R et al. Supercritical carbon dioxide extraction of astaxanthin and other carotenoids from the microalga *Haematococcus pluvialis* [J]. *European food research and technology* 2006 223(6): 787-790.
- [11] 李婷, 韩丽君, 袁毅. 不同有机溶剂对雨生红球藻中虾青素提取成分的影响 [J]. *海洋科学* 2012 36(7): 34-38.
- [12] 陈峰, 姜悦. 微藻生物技术 [M]. 2 版. 北京: 中国轻工业出版社, 1999: 256-267.