

褐色中脉(bmr)高粱农艺性状与饲用价值

韩云华¹, 王显国², 呼天明¹, 薛建国²

(1. 西北农林科技大学动物科技学院草业科学系, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国农业大学草地研究所, 北京 100193)

摘要:高粱(*Sorghum bicolor*)是一种适应性强、抗逆性良好的饲料作物。高粱中褐色中脉(bmr)突变可有效降低木质素含量,提高饲用价值,但 bmr 突变品系在提高饲用价值的同时降低了农艺性状表现。本研究从牧草品质、农艺性状和饲用价值 3 方面论述了国外 bmr 高粱研究概况,并对 bmr 高粱未来研究方向做了展望,旨在为 bmr 高粱在我国的研究利用提供参考。

关键词: bmr 高粱;木质素;饲喂效果;产奶量

中图分类号: S816.15

文献标识码: A

文章编号: 1001-0629(2012)10-1596-08

褐色中脉(Brown midrib)突变体最早出现在玉米(*Zea mays*)中^[1],可引起叶片中脉和茎髓褐色色素沉着,除此之外其茎秆和根还会逐渐呈现红褐色至黄色,普遍认为这种突变品系与木质素含量降低相关。高粱(*Sorghum bicolor*)中褐色中脉突变体人工诱导成功于 1978 年^[2],现已鉴定出 *bmr2*、*bmr6*、*bmr12* 和 *bmr19* 四个独立基因位点^[3],由于 *bmr19* 基因位点在 2008 年才得到鉴定,故现有研究大多集中于 *bmr6*、*bmr12* 两个基因位点中,其中 *bmr12* 基因位点包括两个等位基因,*bmr12* 和 *bmr18*^[4]。

褐色中脉高粱的出现为畜牧业开辟了新的饲料资源,但其较高的饲用价值牺牲了优良的农艺性状。近年来,科技工作者一直着力于研究和改良 bmr 高粱农艺性状,新的 bmr 杂交品种相继出现^[5-9]。同时,对 bmr 高粱与其他饲料作物如苜蓿(*Medicago sativa*)、青贮玉米的饲喂性能比较也有研究,这些研究为 bmr 高粱在畜牧业中的应用提供了可靠的理论支持。

1 牧草品质和植株反应

bmr6 和 *bmr12* 基因可分别降低肉桂醇脱氢酶(CAD)^[10-12]和咖啡-O-甲基转移酶(COMT)^[13]活性,这两种酶作用于木质素生物合成最后两步,导致木质素合成量减少。这种情况的直接结果就是农艺性状的下降。

1.1 木质素和总纤维含量 bmr 突变品系出现以来,以其较低的木质素含量得到人们的广泛重视。*bmr6*、*bmr12*、*bmr18* 均能显著降低木质素含量^[2,14-16]。*bmr12* 对木质素降低效果大于 *bmr6*,降幅可达 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1),*bmr18* 对木质素降低效果变化较大,有报道称 *bmr18* 效果小于 *bmr6*^[17],也有报道称 *bmr18* 效果大于 *bmr6*^[2]。

bmr 基因对木质素的影响为基因效果,与遗传背景无关^[18],在粒型高粱和高丹草(*Z. mays* × *Sorghum sudanense*)两种遗传背景下,*bmr6* 基因均能发挥作用,木质素含量从野生型的 10.3 降至 $8.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中茎秆中木质素含量从 8.3% 降至 6.1% ^[19]。

两个位点 *bmr* 基因对木质素降低的作用有累加效应,双 bmr 突变品种,即 *bmr6* 与 *bmr12* 均发生突变的植株中木质素含量比单一 *bmr6* 或 *bmr12* 突变低。

由于品系与基因的互作效应显著,bmr 高粱中性洗涤纤维(NDF)变化受遗传背景影响较大,有报道称^[15,20-21],*bmr12* 突变品系中 NDF 含量与野生型相当,还有研究表明,由于 *bmr6* 突变品系中纤维素和酸性洗涤木质素(ADL)降低,导致其 NDF 含量下降^[22-24],其中 bmr 高粱与苏丹草(*S. sudanense*)杂交后 NDF 降幅可达 $24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 植株反应 *bmr* 基因对植株农艺性状有负效

* 收稿日期:2012-02-20 接受日期:2012-07-15
基金项目:农业部 948 项目(2011-Z17);国家科技支撑项目(2011BAD17B05);农业部公益性行业专项(200903060);草业科学北京市重点实验室建设项目
作者简介:韩云华(1985-),男,河北张家口人,在读博士生,研究方向为牧草种子生产技术及 bmr 高粱育种。
E-mail: hanyunhua2008@163.com
通信作者:王显国 E-mail: grasschina@126.com

表1 高粱 bmr 突变品种中酸性洗涤木质素和中性洗涤纤维差异^[17,25]

Table 1 Difference of acid detergent fiber (ADF) and acid detergent lignin (ADL) in bmr sorghum mutants^[17,25]

品种 Variety	中性洗涤纤维 NDF/g · kg ⁻¹	酸性洗涤木质素 ADL/g · kg ⁻¹
野生型 Wild type	399(377)	41(28.9)
bmr6	379	31.0
bmr12	392	27.0
bmr18	482	25.2
bmr6 + bmr12	386	21.0

应(表2),这些负效应包括降低株高、增加倒伏、生育期延长、整株干物质含量降低等。通过用具有优良性状的粒用高粱作轮回亲本,与 bmr 杂交体回交可有效改良这些基因缺陷。

1.2.1 株高、分蘖数和收获后再生速率 目前普遍认为 *bmr6* 基因能降低植株株高,而 *bmr12* 对株高的影响不大。*bmr6* 突变品系比 *bmr12* 及野生型矮 9%^[18]。*bmr6* 与 *bmr12* 双突变品系株高与野生型相似,这可能是 *bmr12* 对 *bmr6* 的补偿结果(表3)。甚至有研究表明,*bmr12* 杂交体株高高于野生型^[18]。

Casler 等^[26]发现 *bmr6* 品种 Piper 对环境变化敏感,与 Arlington 相比,在 Wisconsin 州和 Nebraska 州两地分蘖数均下降 67%,导致地面覆盖率降低,并推测分蘖和株高下降可能是导致产量和干物质降低的原因之一。

bmr6 对收获后植株的二次生长影响显著,Casler 等^[26]对比了 3 个 *bmr6* 突变品系及其野生型收获后的生长情况,发现 3 个 *bmr* 突变品系二次生长株高均低于野生型,其中 Greenleaf 突变品系收获后二次生长株高下降 5.3%~19.7%。

1.2.2 生育期 *bmr* 突变品系一般比野生型生育期长,与野生型相比具有开花晚、成熟晚等特征^[7]。Oliver 等^[18]通过对 7 个遗传背景的突变品系研究得出,在试验的所有遗传背景中,*bmr12* 均比野生型品种晚熟,*bmr12* 突变品系成熟期比野生型平均晚 4 d,比 *bmr6* 突变品系晚 3 d。

与单突变品系相比,*bmr6* + *bmr12* 双突变品系对生育期影响与 *bmr12* 相当,50% 开花时间与 *bmr12* 相近,但都比野生型晚 3~4 d(表3)。也有报道称,*bmr12* 基因会缩短生育期,Pedersden 等^[5]2006 年登记的 *bmr12* + *bmr12* 双突变杂交品种“Atlas *bmr-12*”比野生型“Atlas”早熟 4 d。

表2 *bmr6*、*bmr12* 和 *bmr18* 突变品种木质素降低的负效应^[27]

Table 2 Negative effect of reducing lignin caused by *bmr* gene on plant fitness

变异来源 Source of variation	植株效果 Effect on agricultural fitness
<i>bmr6</i>	降低干物质产量 Reduce dry matter yield
	收获后再生性降低 Reduce regrowth following harvest
	降低高度 Reduce height
	减少分蘖 Reduce tilling
<i>bmr12</i>	对环境变化敏感 Environment and variety sensitive
	花期提前 Decreased days to flower
<i>bmr18</i>	未改变花期出现时间 No change in days to flower
	未改变抗病性 No change in sheath blight susceptibility
未鉴定的褐色中脉突变 No mutation identified	增加倒伏 Increased lodging

表3 *bmr* 基因对高粱植株性状的影响^[6,25]

Table 3 Effects of *bmr* gene on agronomic performance of Sorghum^[6,25]

指标 Index	野生型 Wild type	<i>bmr6</i>	<i>bmr12</i>	<i>bmr6</i> + <i>bmr12</i>
50%开花时间 Days to 50% anthesis/d	67	68	71	71
株高 Height/cm	133	126	148	136
种子产量 Grain yield/t · hm ⁻²	8.1	7.7	8.0	7.7
草产量 Biomass yield/t · hm ⁻²	17.7	15.7	14.8	10.5
干物质体外消化率 IVDMD/g · kg ⁻¹	566	596	642	639
秸秆产量 Residue yield/t · hm ⁻²	6.6	5.4	7.0	7.1

1.2.3 种子产量及生物量 种子产量是衡量作物品质优劣的重要指标, *bmr* 基因降低了木质素含量, 同时也导致种子产量下降。研究表明^[18], *bmr6* 突变品系比野生型品系籽粒产量降低 20%, *bmr12* 突变品系比野生型品系降低 24%; 将粒用高粱与 *bmr6* 突变品系再次杂交的 F₂ 代和野生型比较, 发现杂交体籽粒产量与野生型相比降低 11%, 比 *bmr6* 突变品系产量下降幅度(24%)有所减小, 而 *bmr12* 突变品系与粒用高粱再次杂交 F₂ 代种子产量已接近野生型。说明通过利用适当的粒用高粱品种与 *bmr* 突变品系回交, 使粒用高粱优秀农艺性状在后代杂交体中体现, 可能克服 *bmr* 基因导致的籽粒产量下降缺陷。

由于株高降低, 分蘖减少, 与野生高粱相比, *bmr* 显著降低生物量(表 3)。Casler 等^[26] 发现, *bmr6* 高粱苏丹草 3 个突变品种 Greenleaf、FG 和 Piper 的产量均出现不同程度下降, 其中 Piper 草产量降低幅度约为 30%。也有报道称 *bmr12* 高粱秸秆产量高于野生型, Oliver 等^[18] 报道, 种子收获后, *bmr12* 秸秆产量(6 503 kg · hm⁻²)显著高于野生型(5 883 kg · hm⁻²), 也显著高于 *bmr6* (5 284 kg · hm⁻²), *bmr* 双突变后生物量显著低于 *bmr6* 或 *bmr12* 突变品系, 可能是 *bmr* 双突变中两个基因累加效应所致(表 3)。

1.2.4 抗倒伏性能 木质素降低直接导致植株机械维持性能下降, 可能会导致植株抗倒伏性能下降。玉米中 *bmr* 基因导致茎秆抗碎强度降低 17% ~ 26%^[28], 但茎秆抗碎强度与倒伏之间的关系还未见报道。*bmr* 高粱中关于倒伏的研究较少, 目前仅有 Miron 等^[29] 发现 *bmr101* 高粱比商品高粱 FS-5 宜倒伏, 但两者不是野生型。另一个试验比较多个 *bmr* 高粱品种与野生型高粱品种发现, 野生型各品种间以及 *bmr* 高粱各品种间抗倒伏性能各不相同, *bmr* 饲用高粱倒伏率均值为 10.8%, 低于野生型倒伏率均值(18.7%)。若选择 10% 倒伏率为可接受限度, 有 6 个 *bmr* 品种和 12 个野生品种符合要求, 但是 6 个 *bmr* 品种中的 3 个遗传背景相同^[30], 某些 *bmr* 品种虽然木质素含量比野生型含量高, 但仍然出现了倒伏情况。*bmr* 与其野生型抗倒伏性能的对比结果显示, 遗传背景与抗倒伏性能显著相关, 而 *bmr* 基因的影响不显著(表 4)^[15]。

表 4 高粱中遗传背景与 *bmr* 基因对倒伏的影响^[15]

Table 4 Effects of genetic background and *bmr* gene on sorghum lodging^[15]

遗传背景 Genetic background	野生型 Wild type			%
	野生型	<i>bmr6</i>	<i>bmr12</i>	
Atlas	36	36	36	
Early Hegari-Sart	7	7	7	
Kansas Collier	18	19	18	
Rox Orange	30	29	29	

1.2.5 抗病性 木质素构成了植物抵御疾病入侵的第一道物理防线^[31-32], 在生物和非生物胁迫下细胞壁迅速积累大量木质素或木质素酚醛聚合物, 由此可抵御病原体侵入或阻滞其生长。木质素含量降低, 导致植株容易受到病虫害的侵袭^[33-34]。但事实并非如此, 培养基接种及花序梗接种镰刀菌(*Fusarium*)和链格胞菌(*Alternaria* spp.) 试验表明, *bmr* 杂交高粱对镰刀菌属和链格胞菌属的抗性并未下降, 有些甚至高于野生种^[35]。在此基础上, Funnel 和 Pedersen^[36] 研究了不同伤应颜色和不同种皮颜色的 20 个 *bmr* 高粱品种, 结果表明, 白色种皮品种与红色种皮品种对链格胞属和镰刀属病菌抗性相同, 但是在适当环境条件下, 伤应颜色为褐色的品种可能比伤应颜色为紫色的品种更容易感染镰刀菌。

据推断, 由于 *bmr6* 降低肉桂醇脱氢酶(CAD)活性, *bmr12* 降低咖啡-O-甲基转移酶(COMT)活性, 这两种酶均作用于木质素合成的最后两步, 酶活性改变后, 迫使木质素合成前体积聚, 进而通过其他途径转化成水杨酸和其他芳香族植保素, 从而增加植株对病原体的抗性^[37]。随着对 *bmr* 基因的进一步了解以及木质素合成生化途径的完善, *bmr* 基因对于抵御病虫害的作用及病原反应特性将逐渐清晰。

1.3 干物质含量和体外消化速率 *bmr* 突变品系干物质产量低于玉米^[38], Oliver 等^[18] 研究表明, *bmr* 基因对干物质含量影响效果不同, *bmr6* 普遍降低干物质含量, 而 *bmr12* 和 *bmr18* 的效果可能随着遗传背景改变而有所变化; 种子收获后, *bmr12* 突变品系秸秆中干物质含量最高, 比野生型高 11%, *bmr6* 最低, 比野生型低 10%。残茬中干物质含量

与遗传背景有关,不同品系表现不一样,RTx430品系不管是 bmr6 还是 bmr12 突变,秸秆中干物质含量均比野生型低,而在 Wheatland、Tx623 和 Tx631 中,bmr12 突变品系中干物质含量与野生型相当,而 bmr6 突变品系干物质含量低于野生型。bmr18 对干物质含量影响不大,每公顷比野生型高粱低 900 kg,而 bmr6 每公顷比野生型低 4 900 kg^[17]。

木质素是阻止植物体中性洗涤纤维消化的主要成分,bmr 基因降低木质素含量,可显著提高中性洗涤纤维体外消化率(IVNDFD),且不受遗传背景^[19]和生长环境^[15]影响。种子收获后,bmr6 秸秆中 IVNDFD 比野生型提高 4%,bmr12 比野生型提高 10%^[18],bmr12 的茎、叶消化率可分别提高 7.2% 和 5.6%^[39]。bmr 双突变品系与 bmr12 单突变品系对 IVNDFD 的提高幅度相当,比 bmr6 单突变品系提高 7%^[40]。

2 饲用价值评价

bmr 高粱饲喂研究主要集中在采食量、活体消化率、奶牛活动、产奶量及奶品质方面,现普遍认为,bmr 高粱能增加奶牛干物质摄入量,提高产奶量,具有较高饲用价值。同时,也有研究涉及到 bmr 高粱在羊的养殖中的饲用价值评价。

2.1 采食量 bmr 高粱能显著增加奶牛采食量和干物质摄入量。Lusk 等^[41]报道,小乳牛和产奶乳牛对 bmr12 高粱的采食量均大于传统高粱。饲喂 bmr 高粱的奶牛干物质摄入量为 25.3 kg·d⁻¹,显著高于传统高粱的 20.4 kg·d⁻¹,甚至高于青贮玉米(19.6 kg·d⁻¹)和苜蓿(23.1 kg·d⁻¹)。也有研究表明,以代谢体质量百分比表示时,饲喂青贮玉米干物质摄入量(DMI)最大,饲喂 bmr 高粱和苜蓿次之,饲喂传统高粱最低^[21]。上述研究中,bmr 高粱和青贮玉米、苜蓿的干物质摄入量变化规律不一样,这可能与选择的 bmr 高粱品种遗传背景有关,但均证实,bmr 高粱干物质摄入量均大于传统高粱。

关于 NDF 采食量的研究表明,奶牛对 NDF 的采食量 bmr 高粱与传统高粱相近。通过进一步比较奶牛对 bmr6 与 bmr18 两个突变品系的 NDF 摄入量,Oliver 等^[17]发现,奶牛 NDF 采食量 bmr18 与野生型相当,均比 bmr6 突变品系大。但饲喂 bmr 高粱奶牛对木质素的摄入量比传统高粱低 15%^[22]。

2.2 活体消化率 与传统高粱相比,bmr 高粱中

含有大量可消化中性洗涤纤维,这些中性洗涤纤维可在瘤胃中分解,被动物消化,进而显著提高中性洗涤纤维消化率^[17,22,42]。bmr6 突变品系中性洗涤纤维消化率为 54.4%,bmr18 为 47.9%,传统高粱最低,为 40.8%^[17]。羊的饲喂试验也证实,bmr 高粱品种 BMR-101 的中性洗涤纤维消化率明显高于商用高粱品种 FS-5^[43]。

奶牛对 bmr12 高粱干物质消化率比传统高粱高 12.9%^[41]。bmr6 与 bmr18 的干物质消化率分别为 62.9% 和 69.1%,均高于传统高粱的 52.5%^[17]。bmr 高粱品种 BMR-101 和商用高粱品种 FS-5 青贮料饲喂羊后,干物质表观消化率相差不大,但是该试验中 BMR-101 与商用品种 FS-5 不是野生型^[43]。

2.3 对奶牛进食活动的影响 青贮玉米与 bmr 高粱对奶牛采食时间无明显差异^[29],说明奶牛对 bmr 青贮料喜食程度与野生高粱无区别。虽然 bmr 基因导致饲料品质有所变化,但采食 bmr 高粱对奶牛进食和瘤胃活动无影响,这可能与日粮中饲草比例有关。有报道称,日粮中饲草含量大于 50% 时,其 NDF 含量对奶牛进食活动影响不大^[44]。

在 bmr6、bmr18 和野生型青贮料饲喂奶牛对比试验中发现,采食野生型高粱青贮料和 bmr18 突变品系青贮料的奶牛采食时间最长,采食 bmr6 青贮料的奶牛反刍时间最长,但是饲料种类未对奶牛总的进食活动产生影响^[17]。

2.4 产奶量及奶品质 传统高粱中木质素含量较高,且难以被消化,动物摄取大量高粱后,木质素增加了消化道填充率,降低了干物质摄入量,导致产奶量下降。bmr 高粱中木质素含量低于传统高粱,饲喂 bmr 高粱奶牛对木质素摄入减少 15%,产奶量比传统高粱高 23%^[23]。

饲喂 bmr6 奶牛产奶性能优于饲喂 bmr18。bmr6 突变品系较低的木质素含量使奶牛产奶性能优于饲喂 bmr18 突变品系,饲喂 bmr6 突变品系与青贮玉米奶牛产奶量相当,分别为 33.7 和 33.3 kg·d⁻¹,bmr18 居中,为 31.2 kg·d⁻¹,传统高粱最低,为 29.1 kg·d⁻¹^[17]。

标准乳产量饲喂 bmr 高粱高于饲喂普通高粱。饲喂 bmr 高粱的奶牛产奶量和 4% 标准乳产量比饲喂普通高粱的奶牛高 13%^[20]。在一些木质素含量

低至与青贮玉米相当的 *bmr* 高粱品种中, 饲喂 *bmr* 高粱的奶牛产奶量和 4% 标准乳产量与青贮玉米和苜蓿相当^[22,41]。长期饲喂 *bmr* 高粱后, 奶牛产奶量与青贮玉米相当^[21], 且 *bmr* 高粱抗旱性优于玉米, 在干旱半干旱地区 *bmr* 高粱有望取代青贮玉米加入奶牛饲料。

早期饲喂试验可能是选择了 *bmr12* 或 *bmr18* 的原因, 饲喂 *bmr* 高粱后, 牛奶中乳脂含量与饲喂普通高粱无区别, 但由于产奶量提高, 乳脂总量高^[21]。后经进一步对比试验得出(表 5), 饲喂 *bmr18* 或 *bmr12* 高粱对牛奶中乳脂含量影响不大, 而 *bmr6* 能将乳脂率从 3.57% 提高到 3.89%^[17,41], 已接近青贮玉米。

表 5 褐色中脉 *bmr* 基因对青贮料营养价值和产奶性能的影响^[17]

Table 5 Effects of *bmr* gene on silage feeding value and milk production^[17]

项目 Item	野生型 Wild type	<i>bmr6</i>	<i>bmr18</i>
高粱青贮料 Sorghum silage			
中性洗涤纤维 NDF/g · kg ⁻¹	581	502	482
酸性洗涤纤维 ADF/g · kg ⁻¹	377	336	285
酸性洗涤木质素 ADL/g · kg ⁻¹	29	23	25
全消化道消化率 Total tract digestibility			
干物质 DM/g · kg ⁻¹	525	629	691
中性洗涤纤维 NDF/g · kg ⁻¹	408	544	479
哺乳期表现 Lactational performance			
产奶量 Milk/kg · d ⁻¹	31.0	34.1	32.2
乳脂率 Milk fat/%	3.57	3.89	3.77
4% 标准乳			
4% fat corrected milk/kg · d ⁻¹	29.1	33.7	31.2

饲喂 *bmr* 高粱、传统高粱和青贮玉米三者相比, 牛奶中乳蛋白含量相当^[21-22]。进一步对比试验表明, *bmr6* 和 *bmr18* 饲喂奶牛后, 乳蛋白含量相差不大^[17]。*bmr* 高粱对牛奶中乳糖含量影响不大, 也有研究发现 *bmr* 高粱饲喂奶牛后, 乳糖含量较高(4.86%), 且显著高于传统高粱(4.72%)^[22]。

3 结论与展望

综合研究, *bmr12* 和 *bmr18* 在农艺性状方面优于 *bmr6* 基因, 某些性状已接近甚至超过野生型, 而

bmr6 在饲喂效果方面优于 *bmr12* 和 *bmr18* 基因, 某些 *bmr6* 品种产奶量与奶品质已与青贮玉米相当。近年来, *bmr6* 与 *bmr12* 双突变品系的出现, 可能会在农艺性状与饲用价值之间找到一个平衡点。

国外目前研究重点已经由 *bmr* 导致木质素降低的表现效应研究转移至一系列多样化功能基因的鉴定工作中^[3,45-46], 而国内对于 *bmr* 突变品系的相关研究还未见报道。未来 *bmr* 高粱的研究可集中在抗倒伏性能、抗病虫害机理的研究^[46]。*bmr* 高粱应用方面, 国外已出现 *bmr* 高粱在生物能源中的应用^[46-50], 并表现出良好的前景。有报道称, 与野生型相比, 稀酸处理后 *bmr6*、*bmr12* 和 *bmr6*+*bmr12* 双突变葡萄糖产量分别提高 27%、23% 和 34%, 乙醇产量分别增加 22%、21% 和 43%^[47]。

近年来, 我国畜牧业迅速发展, 而优质饲草资源短缺, 据预测国内优质草产品市场容量约为 1 000 万 t, 而每年我国供应苜蓿能力约为 20 万 t^[51], 供需矛盾严重。高粱具有高生物量、水肥利用效率高、耐贫瘠、对生物和非生物胁迫抗性强等特性, 种植高粱可有效利用盐碱地和滩涂等土地, 增加饲草种植面积。合理利用 *bmr* 突变品系特性与传统粒用高粱杂交培育农艺性状和饲用价值优良的品种, 将使 *bmr* 高粱在饲料资源开发中发挥巨大的作用。

参考文献

- [1] Jorgenson L R. Brown midrib in maize and its linkage relations[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1931, 23(7): 549-557.
- [2] Porter K S, Axtell J D, Lechtenberg V L, et al. Phenotype, fiber composition, and *in vitro* dry matter disappearance of chemically induced brown midrib (*bmr*) mutants of sorghum[J]. Crop Science, 1978, 18(2): 205-208.
- [3] Saballos A, Vermerris W, Rivera L, et al. Allelic association, chemical characterization and saccharification properties of brown midrib mutants of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)[J]. BioEnergy Research, 2008, 1: 193-204.
- [4] Bittinger T S, Cantrell R P, Axtell J D. Allelism tests of the brown-midrib mutants of sorghum[J]. Journal of Heredity, 1981, 72(2): 147-148.
- [5] Pedersen J F, Funnell D L, Toy J J, et al. Registration of 'Atlas *bmr*-12' forage sorghum[J]. Crop Science,

- 2006,46(1):478.
- [6] Pedersen J F, Toy J J, Funnell D L, *et al.* Registration of BN611, AN612, BN612, and RN613 sorghum genetic stocks with stacked *bmr-6* and *bmr-12* genes[J]. Journal of Plant Registrations, 2008, 2(3):258-262.
- [7] Pedersen J F, Toy J J. Registration of N316-N320 sorghum nuclear male-sterility genetic stocks [J]. Crop Science, 2001, 41(2):607.
- [8] Pedersen J F, Funnell D L, Toy J J, *et al.* Registration of seven forage sorghum genetic stocks near-isogenic for the brown midrib genes *bmr-6* and *bmr-12* [J]. Crop Science, 2006, 46(1):490-491.
- [9] Pedersen J F, Funnell D L, Toy J J, *et al.* Registration of twelve grain sorghum genetic stocks near-isogenic for the brown midrib genes *bmr-6* and *bmr-12* [J]. Crop Science, 2006, 46(1):491-492.
- [10] Saballos A, Ejeta G, Sanchez E, *et al.* A genomewide analysis of the cinnamyl alcohol dehydrogenase family in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] identifies SbCAD2 as the *Brown midrib 6* gene [J]. Genetics, 2009, 181(2):783-795.
- [11] Sattler S E, Saathoff A J, Haas E J, *et al.* A Nonsense mutation in a cinnamyl alcohol dehydrogenase gene is responsible for the sorghum brown midrib6 phenotype [J]. Plant Physiology, 2009, 150(2):584-595.
- [12] Pillonel C, Mulder M M, Boon J J, *et al.* Involvement of cinnamyl-alcohol dehydrogenase in the control of lignin formation in *Sorghum bicolor* L. Moench [J]. Planta, 1991, 185(4):538-544.
- [13] Bout S, Vermerris W. A candidate-gene approach to clone the sorghum brown midrib gene encoding caffeic acid O-methyltransferase [J]. Molecular Genetics and Genomics, 2003, 269(2):205-214.
- [14] Akin D E, Hanna W W, Snook M E, *et al.* Normal-12 and brown midrib-12 sorghum. II. Chemical variations and digestibility [J]. Agronomy Journal, 1985, 78(5):832-837.
- [15] Oliver A L, Pedersen J F, Grant R J, *et al.* Comparative effects of the sorghum *bmr-6* and *bmr-12* genes. I. Forage sorghum yield and quality [J]. Crop Science, 2005, 45(6):2234-2239.
- [16] Bucholtz D L, Cantrell R P, Axtell J D, *et al.* Lignin biochemistry of normal and brown midrib mutant sorghum [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1980, 28(6):1239-1241.
- [17] Oliver A L, Grant R J, Pedersen J F, *et al.* Comparison of brown midrib-6 and -18 forage sorghum with conventional sorghum and silage in diets of lactating dairy cows [J]. Journal of Dairy Science, 2004, 87(3):637-644.
- [18] Oliver A L, Pedersen J F, Grant R J, *et al.* Comparative effects of the sorghum *bmr-6* and *bmr-12* genes. II. Grain yield, stover yield, and stover quality in grain sorghum [J]. Crop Science, 2005, 45(6):2240-2245.
- [19] Fritz J O, Cantrell R P, Lechtenberg V L, *et al.* Brown midrib mutants in sudangrass and grain sorghum [J]. Crop Science, 1980, 21(5):706-709.
- [20] Aydin G, Grant R J, O'Rear J. Brown midrib sorghum in diets for lactating dairy cows [J]. Journal of Dairy Science, 1999, 82(10):2127-35.
- [21] Grant R J, Haddad S G, Moore K J, *et al.* Brown midrib sorghum silage for midlactation dairy cows [J]. Journal of Dairy Science, 1995, 78(9):1970-1980.
- [22] Gerhardt R L, Fritz J O, Moore K J, *et al.* Digestion kinetics and composition of normal and brown midrib sorghum morphological components [J]. Crop Science, 1994, 34(5):1353-1361.
- [23] Thorstensson E M G, Buxton D R, Cherney J H. Apparent inhibition to digestion by lignin in normal and brown midrib stems [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1992, 59(2):183-188.
- [24] Fritz J O, Moore K J, Jaster E H. In situ digestion kinetics and ruminal turnover rates of normal and brown midrib mutant sorghum × sudangrass hays fed to non-lactating holstein cows [J]. Journal of Dairy Science, 1988, 71(12):3345-3351.
- [25] Sattler S E, Funnell-Harris D L, Pedersen J F. Efficacy of singular and stacked brown midrib 6 and 12 in the modification of lignocellulose and grain chemistry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(6):3611-3616.
- [26] Casler M D, Pedersen J F, Undersander D J. Forage yield and economic losses associated with the brown-midrib trait in sudangrass [J]. Crop Science, 2003, 43(3):782-789.
- [27] Pedersen J F, Vogel K P, Funnell D L. Impact of reduced lignin on plant fitness [J]. Crop Science, 2005, 45:812-819.
- [28] Zuber M S, Colbert T R, Bauman L F. Effect of brown-midrib-3 mutant in maize (*Zea mays* L.) on stalk

- strength[J]. *Zeitschrift fur Pflanzenzuchtung*, 1977, 79; 310-314.
- [29] Miron J, Zuckerman E, Adin G, *et al.* Comparison of two forage sorghum varieties with corn and the effect of feeding their silages on eating behavior and lactation performance of dairy cows[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 139(1):23-39.
- [30] Miller F, Stroup J A. Brown midrib forage sorghum, sudangrass, and corn: What is the potential? [A]. In: *Proceedings of 33rd California Alfalfa and Forage Symposium*[C]. Monterey, CA: University of California Cooperative Extension, University of California, Davis, CA, 2003; 143-151.
- [31] Bonello P, Storer A J, Gordon T R, *et al.* Systemic effects of heterobasidion annosum on ferulic acid glucoside and lignin of presymptomatic ponderosa pine phloem, and potential effects on bark-beetle-associated fungi [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2003, 29(5):1167-1182.
- [32] Buendgen M R, Coors J G, Grombacher A W, *et al.* European corn borer resistance and cell wall composition of three maize populations [J]. *Crop Science*, 1988, 30(3):505-510.
- [33] Campbell M M, Sederoff R R. Variation in lignin content and composition (mechanisms of control and implications for the genetic improvement of plants)[J]. *Plant Physiology*, 1996, 110(1):3-13.
- [34] Bird P M. The role of lignification in plant disease[A]. In: *Experimental and Conceptual Plant Phytopathology* [M]. New Delhi, India: Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. ,1988.
- [35] Funnell D L, Pedersen J F. Reaction of sorghum lines genetically modified for reduced lignin content to infection by *Fusarium* and *Alternaria* spp [J]. *Plant Disease*, 2006, 90(4):331-338.
- [36] Funnell D L, Pedersen J F. Association of plant color and pericarp color with colonization of grain by members of *Fusarium* and *Alternaria* in near-isogenic sorghum lines[J]. *Plant Disease*, 2006, 90(4):411-418.
- [37] Funnell D L, Pedersen J F, Sattler S E. Ferulic acid glucoside and lignin of presymptomatic ponderosa pine phloem[J]. *Phytopathology*, 2010, 100:671-681.
- [38] Marsalis M A, Angadi S V, Contreras-Govea F E. Dry matter yield and nutritive value of corn, forage sorghum, and BMR forage sorghum at different plant populations and nitrogen rates[J]. *Field Crops Research*, 2010, 116(1-2):52-57.
- [39] Hanna W W, Monson W G, Gaines T P. IVDMD, total sugars, and lignin measurements on normal and brown midrib (bmr) sorghums at various stages of development[J]. *Agronomy Journal*, 1981, 73(6):1050-1052.
- [40] Sattler S E, Funnell-Harris D L, Pedersen J F. Efficacy of singular and stacked brown midrib 6 and 12 in the modification of lignocellulose and grain chemistry [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(6):3611-3616.
- [41] Lusk J W, Karau P K, Balogu D O, *et al.* Brown midrib sorghum or corn silage for milk production 1[J]. *Journal of Dairy Science*, 1984, 67(8):1739-1744.
- [42] Bal M A, Shaver R D, Shinnors K J, *et al.* Stage of maturity, processing, and hybrid effects on ruminal in situ disappearance of whole-plant corn silage[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2000, 86(1-2):83-94.
- [43] Miron J, Zuckerman E, Adin G, *et al.* Field yield, ensiling properties and digestibility by sheep of silages from two forage sorghum varieties[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 136(3-4):203-215.
- [44] De Boever J L, Andries J I, De Brabander D L, *et al.* Chewing activity of ruminants as a measure of physical structure—A review of factors affecting it[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1990, 27(4):281-291.
- [45] Xin Z, Li Wang M, Barkley N, *et al.* Applying genotyping (TILLING) and phenotyping analyses to elucidate gene function in a chemically induced sorghum mutant population[J]. *BMC Plant Biology*, 2008,
- [46] Xin Z, Wang M, Burow G, *et al.* An induced sorghum mutant population suitable for bioenergy research[J]. *BioEnergy Research*, 2009, 2:10-16.
- [47] Sattler S E, Funnell-Harris D L, Pedersen J F. Brown midrib mutations and their importance to the utilization of maize, sorghum, and pearl millet lignocellulosic tissues[J]. *Plant Science*, 2010, 178:229-238.
- [48] Dien B, Sarath G, Pedersen J F, *et al.* Improved sugar conversion and ethanol yield for forage sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) lines with reduced lignin contents [J]. *BioEnergy Research*, 2009, 2(3):153-164.
- [49] Sarath G, Mitchell R B, Sattler S E, *et al.* Opportuni-

- ties and roadblocks in utilizing forages and small grains for liquid fuels[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2008, 35: 343-354.
- [50] Xin Z, Wang M, Burow G, *et al.* An induced sorghum mutant population suitable for bioenergy research[J].

BioEnergy Research, 2009, 2(1): 10-16.

- [51] 云锦凤, 孙启忠. 抓住机遇开创我国苜蓿产业化新局面[A]. 第二届中国苜蓿发展大会暨牧草种子、机械、产品展示会论文集[C]. 北京: 中国草学会, 2003.

Agronomic performance and feeding value of brown midrib sorghum

HAN Yun-hua¹, WANG Xian-guo², HU Tian-ming¹, XUE Jian-guo²

(1. College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Grassland Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: *Sorghum bicolor* is an annual forage source with good fitness and resistance. Although the mutants of brown midrib sorghum are able to increase high feeding value by reducing lignin content, they reduce the agronomic performance. This study reviewed the progress of bmr sorghum at abroad from forage quality, agronomic performance and feeding value, and propose the future focuses, which would provide useful information for bmr sorghum research.

Key words: bmr sorghum; lignin; feed effect; milk production

Corresponding author: WANG Xian-guo E-mail: grasschina@126.com

2012年9月国际市场主要饲料与畜产品价格分析

美国玉米价格环比下降 5.0%; 高粱价格环比下降 1.8%; 大豆价格较 8 月基本没变化。

国际畜产品价格涨跌互现。瘦肉猪价格环比下降 11.9%; 育肥牛价格环比上涨 3.2%; 欧盟猪肉价格环比上涨 10.7%; 新西兰羊羔肉价格环比上涨 1.9%。

表 1 9 月国际市场主要饲料与畜产品平均价格

饲料	价格	畜产品	价格
玉米	301.61 USD · t ⁻¹	瘦肉猪	1.63 USD · kg ⁻¹
大豆	619.22 USD · t ⁻¹	育肥牛	3.19 USD · kg ⁻¹
高粱	230.86 AUD · t ⁻¹	猪肉*	2.37 USD · kg ⁻¹
豆粕	617.94 USD · t ⁻¹	鸡肉**	2.11 USD · kg ⁻¹
菜籽	628.84 CAD · t ⁻¹	牛肉**	4.32 USD · kg ⁻¹
豆饼	515.37 USD · t ⁻¹	羊肉***	1.74 USD · kg ⁻¹
棉籽饼	425.00 USD · t ⁻¹	羊羔肉***	3.77 USD · kg ⁻¹
苜蓿粉	361.67 USD · t ⁻¹	牛奶	0.35 USD · kg ⁻¹

注: * 表示欧盟, ** 表示美国, *** 表示新西兰。9 月参考汇率为 1CNY(人民币) = 0.159 USD(美元) = 0.155 AUD(澳元) = 0.155 CAD(加元) = 0.099 GBP(英镑)。

(兰州大学草地农业科技学院 孙义)