

## 旱地春小麦籽粒碳同位素分辨率及冠层温度与产量的关系

牟会荣<sup>1,2</sup>

(1. 南京农业大学农学院, 江苏南京 210059; 2. 江苏科技大学生物与化学工程学院, 江苏镇江 212018)

**摘要** [目的]探讨小麦冠层温度和叶绿素含量替代碳同位素分辨率(*CID*)进行抗旱育种的可靠性。[方法]以抗旱性不同的5个春小麦品种为材料,测定正常灌溉和干旱处理的籽粒*CID*、开花期与灌浆中期的冠层温度以及旗叶叶绿素含量指数,并分析这些指标与籽粒产量的关系。[结果]在干旱、灌水条件下,籽粒*CID*均与产量显著正相关( $P \leq 0.01$ );灌浆中期的冠层温度在干旱条件下与籽粒*CID*显著负相关( $P \leq 0.05$ ),但在灌水条件下与后者相关不明显,开花期的冠层温度在2种条件下与籽粒产量及*CID*均无明显相关;在2种处理下,旗叶叶绿素含量与*CID*均无明显相关。[结论]灌浆中期的冠层温度仅在干旱条件下可以替代籽粒*CID*进行抗旱品种选育,而在干旱和灌水条件下开花期冠层温度和旗叶叶绿素含量均不能用作籽粒*CID*的替代指标。

**关键词** 小麦;干旱;碳同位素分辨率;冠层温度;叶绿素含量

**中图分类号** S512 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)26-10567-03

### Relationships among Grain Carbon Isotope Discrimination, Canopy Temperature and Yield in Spring Wheat under Drought Conditions

MU Hui-rong (College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210059)

**Abstract** [Objective] The aim was to study the reliability of using canopy temperature and chlorophyll content to replace carbon isotope discrimination (*CID*) in wheat breeding for drought tolerance. [Method] Five spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars, differing in drought tolerance, were planted in drought and irrigated conditions to measure grain *CID*, canopy temperature during anthesis and mid-filling stage and chlorophyll content of flag leaves. The correlation among those items and grain yield were evaluated. [Result] Grain yield and *CID* were related to a significant positive correlation in drought and irrigated conditions. Canopy temperature during mid-filling stage was related to a significant negative correlation to *CID* in drought, while no significant correlation in irrigated conditions. Canopy temperature during anthesis had no significant correlation with *CID* in both conditions, so was chlorophyll content of flag leaves. [Conclusion] In wheat breeding for drought tolerance, canopy temperature during mid-filling stage can be used to replace grain *CID* in drought conditions, while canopy temperature during anthesis and chlorophyll content of flag leaves can't be used to replace *CID* neither in drought nor in irrigated conditions.

**Key words** Wheat; Drought; Carbon Isotope discrimination; Canopy temperature; Chlorophyll content

干旱是影响小麦产量的最重要因素之一。培育高水分利用效率的高产小麦品种极具现实意义,而筛选准确、有效的抗旱指标成为小麦抗旱育种的基础和研究热点<sup>[1]</sup>。许多研究表明,小麦籽粒的碳同位素分辨率(Carbon isotope discrimination, *CID*)与产量正相关<sup>[1-4]</sup>,与其植株水分利用效率显著负相关<sup>[2]</sup>,并且*CID*具有较高的遗传力<sup>[5]</sup>,可作为小麦抗旱育种的选育指标<sup>[6-7]</sup>。但是,由于*CID*的测定成本较高,围绕寻找其替代指标的研究近年来陆续展开。已有研究表明,灌浆中后期的小麦旗叶气孔导度和叶温<sup>[8]</sup>、抽穗至成熟期的叶绿素含量<sup>[9]</sup>以及灌浆期的冠层温度<sup>[10]</sup>等均与*CID*具有较强的相关性,可作为*CID*的替代指标。笔者以抗旱性不同的春小麦品种为材料,探讨干旱条件下小麦籽粒*CID*、不同时期冠层温度(Canopy temperature, *CT*)以及旗叶叶绿素含量等性状与产量之间的关系,就*CT*和旗叶叶绿素含量替代*CID*选育小麦抗旱品种的可靠性进行分析,以期小麦抗旱品种的选育提供理论依据。

## 1 材料与方 法

**1.1 试验材料** 选用材料为5种抗性能力不同的春小麦品种,包括耐旱高产型小麦品种Alpowa(白色软质麦)、耐旱低产型品种Agawam(白色硬质麦)、水分敏感高产型品种IDO686(白色软质麦)、敏感低产型品种IDO599(白色软质麦)与IDO702(红色硬质麦)<sup>[11]</sup>。

**1.2 试验设计** 2012年在美国爱达荷大学阿伯丁试验基地开展试验。该地年均温7.2~8.3℃,年均降水量203~279mm。在2012年4月15日播种,小区面积为3.5m×2.5m。设2组处理:正常灌溉(CK)和干旱处理,重复8次。开花前2组灌溉相同,从开花期开始进行不同处理:CK进行定期灌溉,而干旱处理则不再浇水。

## 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 冠层温度的测定。**在小麦开花期与灌浆中期,在一天中13:00~15:00之间用便携式红外测温仪(Irtec MicroRay HCIDAC, Langhorne, PA, USA)分别测定各小区春小麦的开花期冠层温度(*CTA*)、灌浆期冠层温度(*CTF*)和冠层空气温度,计算二者差值。在当地时间13:00~15:00之间测定温差可以在最小程度上降低空气温度对试验数据的影响,因而采用在13:00~15:00之间测定的温差值。每个小区重复测定5次,取平均值作为该小区的温差值。

**1.3.2 叶绿素含量指标的测定。**在开花期取生长一致、朝向一致的带穗旗叶。使用CCM-200便携式叶绿素含量测定仪(CCM-200, Opti-Sciences Inc, NH, USA)测定叶绿素含量指数(Chlorophyll content index, *CCI*),重复5次,取平均值作为该小区小麦旗叶的*CCI*。

**1.3.3 碳同位素分辨率的测定。**在小麦成熟期,分别取每个种植小区的少量籽粒样品,将样本放至80℃下烘干48h,然后研磨,过0.5mm筛。将待测样品送至奥古斯塔纳学院,用同位素质谱仪测定和计算出各样品的碳同位素组成,并根据Farquhar等<sup>[2]</sup>的公式计算*CID*。

**1.3.4 籽粒产量的测定。**小麦成熟后,收获各小区小麦籽

**基金项目** 中国博士后科学基金项目(20110491442);江苏省博士后科学基金项目(1101059C)。

**作者简介** 牟会荣(1972-),女,山东日照人,副教授,博士,从事植物生理生态方面的研究, E-mail: muhuir@163.com。

**收稿日期** 2013-08-05

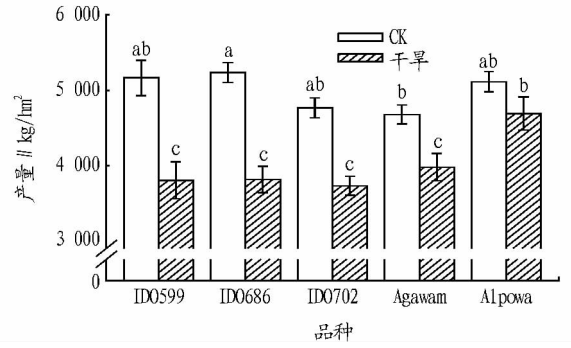
粒,将每个种植小区所收获得到的小麦籽粒产量通过换算即得到该品种的产量。

**1.4 数据分析与利用** 采用 SPSS 21 (Statistical Package for the Social Science) 软件对试验数据进行处理和统计分析,用 LSD (Least significant difference) 法进行多重比较,并用 SigmaPlot 10.0 作图。

## 2 结果与分析

**2.1 干旱对小麦籽粒产量的影响** 由图 1 可知,干旱显著降低了各小麦品种的籽粒产量 ( $P \leq 0.01$ ),5 个小麦品种的平均籽粒产量较 CK 下降 19.77%。籽粒产量对干旱的响应因品种而异。CK 产量较高(均超过  $5\ 100\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ) 的 IDO599、IDO686 和 Alpowa 在干旱条件下的产量降幅分别为 26.31% ( $P \leq 0.01$ )、27.13% ( $P \leq 0.01$ ) 和 8.23%; 而产量较低的 IDO702 和 Agawam 在干旱条件下的产量降幅分别为 21.74% ( $P \leq 0.01$ ) 和 14.91% ( $P \leq 0.01$ )。

**2.2 干旱对小麦籽粒 CID 的影响** 由图 2 可知,干旱显著降低了小麦籽粒的 CID ( $P \leq 0.05$ ),且不同品种籽粒 CID 对

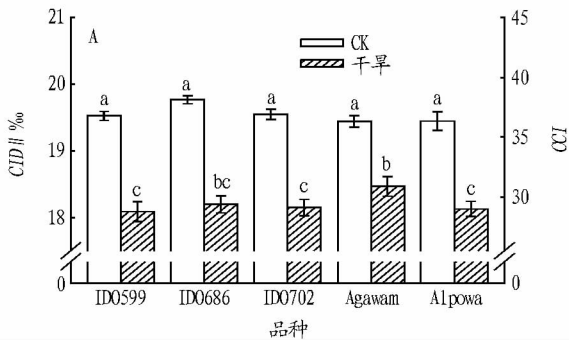


注:不同小写字母表示差异在 0.05 水平显著。

图 1 干旱对小麦籽粒产量的影响

干旱的响应不同。IDO686 和 IDO599 的籽粒 CID 在干旱条件下较 CK 降幅较大,分别为 7.92% ( $P \leq 0.01$ ) 和 7.36% ( $P \leq 0.01$ ),而 Agawam 的籽粒 CID 降幅较低,为 5.03% ( $P \leq 0.01$ )。品种间比较,5 个小麦品种的籽粒 CID 间没有明显差异。

**2.3 干旱对小麦旗叶 CCI 的影响** 由图 2 可知,干旱处理

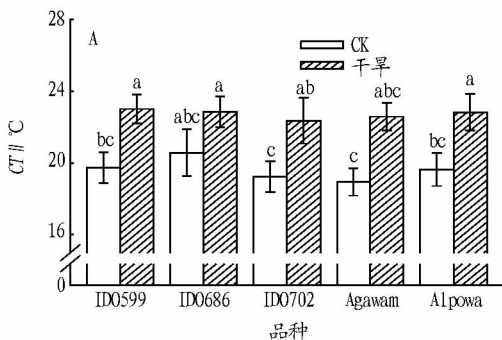


注:不同小写字母表示差异在 0.05 水平显著。

图 2 干旱对小麦籽粒 CID (A) 和 CCI (B) 的影响

显著提高了小麦旗叶 CCI,增幅为 7.30% ( $P \leq 0.05$ ),但就每一个品种而言,在干旱和 CK 条件下旗叶 CCI 差异均未达显著水平。品种间比较,Alpowa 的旗叶 CCI 最高,其次为 IDO 702,而 IDO 686 的 CCI 显著低于其他品种 ( $P \leq 0.01$ )。

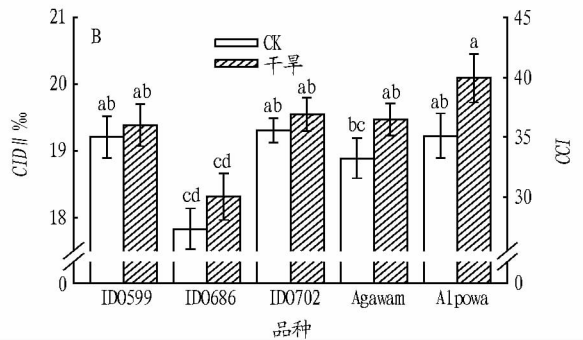
**2.4 干旱对开花期和灌浆中期小麦 CT 的影响** 由图 3 可知,干旱处理显著降低了小麦群体的冠层温差 ( $P \leq 0.01$ ),降



注:不同小写字母表示差异在 0.05 水平显著。

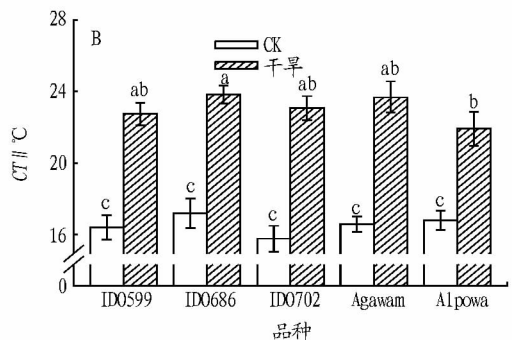
图 3 干旱对不同春小麦品种开花期 (A) 和灌浆中期 (B) 冠层温度的影响

0.01 水平显著正相关,与开花期和灌浆期 CT 显著负相关 ( $P$



低幅度因处理时期而异,干旱处理的小麦开花期 CT 平均较 CK 下降 13.64%,其中降幅最小和最大的分别为 IDO686 和 Agawam;灌浆期 CT 在干旱处理下平均较 CK 下降 28.03%,而最小和最大降幅的分别为 23.18% (Alpowa) 和 31.50% (IDO702)。各品种间没有明显差异。

**2.5 相关性分析** 由表 1~3 可知,小麦籽粒产量与 CID 呈



$\leq 0.01$ ,与后者的相关性为  $-0.717^{**}$ ,远大于前者),与旗叶

*CCI* 相关性不明显。*CID* 与开花期、灌浆期 *CT* 以及旗叶 *CCI* 均显著负相关 ( $P \leq 0.01$ ), 且与灌浆期 *CT* 的相关性 ( $-0.813^{**}$ ) 远大于其他。在干旱条件下, 籽粒产量与 *CID* ( $0.538^{**}$ ) 和灌浆期 *CT* ( $-0.528^{**}$ ) 均显著相关 ( $P \leq 0.01$ ), 且 *CID* 和灌浆期 *CT* 显著负相关 ( $P \leq 0.05$ ), 而与开花期 *CT* 和旗叶 *CCI* 的相关性不明显; 在灌溉条件下, 籽粒产量与 *CID* ( $0.398^{**}$ ) 呈显著正相关 ( $P \leq 0.01$ ), 但与两时期 *CT* 和旗叶 *CCI* 相关关系不明显。

表 1 相关性分析(两处理)

指标	产量	<i>CID</i>	<i>CTA</i>	<i>CTF</i>	<i>CCI</i>
产量	1.000				
<i>CID</i>	0.754 <sup>**</sup>	1.000			
<i>CTA</i>	-0.492 <sup>**</sup>	-0.533 <sup>**</sup>	1.000		
<i>CTF</i>	-0.717 <sup>**</sup>	-0.813 <sup>**</sup>	0.640 <sup>**</sup>	1.000	
<i>CCI</i>	-0.065	-0.328 <sup>**</sup>	-0.031	0.144	1.000

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 2 相关性分析(干旱)

指标	产量	<i>CID</i>	<i>CTA</i>	<i>CTF</i>	<i>CCI</i>
产量	1.000				
<i>CID</i>	0.538 <sup>**</sup>	1.000			
<i>CTA</i>	-0.154	-0.089	1.000		
<i>CTF</i>	-0.528 <sup>**</sup>	-0.378 <sup>*</sup>	0.103	1.000	
<i>CCI</i>	-0.249	-0.232	-0.356 <sup>*</sup>	0.130	1.000

注: \*, \*\* 分别表示在 0.05, 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 3 相关性分析(灌溉)

指标	产量	<i>CID</i>	<i>CTA</i>	<i>CTF</i>	<i>CCI</i>
产量	1.000				
<i>CID</i>	0.398 <sup>**</sup>	1.000			
<i>CTA</i>	-0.242	-0.170	1.000		
<i>CTF</i>	-0.225	-0.018	0.688 <sup>**</sup>	1.000	
<i>CCI</i>	-0.055	-0.271	-0.133	0.197	1.000

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

### 3 讨论

Farquhar 和 Richards 在 1984 年首次发现产量与 *CID* 呈正相关, *CID* 可以作为筛选高产基因型的替代指标。随后, 许多学者的研究表明, *CID* 与产量间关系受试验环境水分条件及样品取样时期等外界因素的影响。李树华等<sup>[12]</sup> 研究发现, 在雨养条件下籽粒 *CID* 与产量相关不显著, 但 *CID* 低的材料在雨养条件下具有较高的产量; 在有限灌溉条件下籽粒 *CID* 与产量呈显著正相关 ( $P \leq 0.05$ )。Condon 等<sup>[13]</sup> 认为, *CID* 和生物量的关系由种植地的气候条件决定, 即在干旱地区和干旱季节 *CID* 与生物量呈负相关; 在湿润地区和湿润季节, *CID* 与生物量呈正相关; 中间情形下, 二者无关。许多研究表明, 成熟期籽粒 *CID* 与小麦产量呈显著正相关 ( $P \leq 0.01$ )<sup>[14-17]</sup>, 而生育早期的样品 *CID* 与产量呈显著负相关<sup>[18-19]</sup>。研究中, 干旱处理显著降低了小麦籽粒产量及 *CID* ( $P \leq 0.05$ ), 且降低幅度因品种而异, 即耐旱高产型小麦品种 Alpowa 籽粒产量在干旱和灌溉条件下均较高, 且变幅最小 (8.23%), 籽粒 *CID* 在干旱条件下的降幅为 6.78% ( $P \leq 0.01$ ); 而耐旱低产型品种 Agawam 在 2 种水分条件下籽粒产量、变幅均较小, 籽粒 *CID* 的降幅也较小; 水分敏感高产型品种 IDO686 在水分充足条件下籽粒产量较高, 但在干旱条件

下产量下降幅度较大, 而敏感低产型品种 IDO599 与 IDO702 则表现为在水分充足条件下籽粒产量不高, 且在干旱条件下产量下降幅度较大, 这 3 个品种籽粒 *CID* 在干旱条件下的降幅为 7.16% ~ 7.92% ( $P \leq 0.01$ )。相关性分析结果表明, 在该研究条件下, 籽粒 *CID* 与产量在干旱、灌溉条件下均呈显著正相关。因此, *CID* 是进行抗旱品种选育的良好指标。

作为衡量作物缺水诊断指标, *CT* 近年来已成为抗旱基因型选育的重要依据<sup>[20-22]</sup>。樊廷录等<sup>[20]</sup> 发现, 旱地冬小麦产量、水分利用效率与灌浆中后期的 *CT* 均呈显著负相关 ( $P \leq 0.05$ ), 认为 *CT* 在评价小麦产量和水分利用效率上具有较高的可靠性。李树华等<sup>[10]</sup> 研究表明, 在有限灌溉、雨养条件下, 灌浆期 *CT* 与成熟期籽粒 *CID* 呈显著负相关 ( $P \leq 0.01$ ), 说明灌浆期的 *CT* 作为 *CID* 的替代指标具有较强的可靠性。研究中, 干旱处理显著提高了小麦冠层的 *CT* ( $P \leq 0.05$ ), 且灌浆期 *CT* 的降幅 (28.03%,  $P \leq 0.001$ ) 远大于开花期 (13.64%,  $P \leq 0.01$ )。将 2 个处理进行相关性分析, 发现开花期 *CTA* 和灌浆期 *CTF* 均与籽粒 *CID*、产量显著负相关 ( $P \leq 0.05$ ), 且 *CTF* 的相关性要高于 *CTA*。在干旱处理下, *CTF* 与籽粒 *CID*、产量呈显著负相关 ( $P \leq 0.05$ ), 而 *CTA* 与二者相关关系不明显。在灌溉条件下, *CTA*、*CTF* 与籽粒 *CID*、产量相关性均不明显, 表明在干旱条件下, *CTF* 可以作为替代 *CID* 进行抗旱品种选育的良好指标, 而灌溉条件下则不适宜。

近年来, 有研究发现, 小麦叶绿素含量与叶片 *CID* 呈显著正相关 ( $P \leq 0.01$ ), 认为可将 *CCI* 作为小麦抗旱生理指标<sup>[9,23]</sup>。研究中, 开花期旗叶 *CCI* 在干旱处理下均呈显著提高 ( $P \leq 0.05$ ), 且耐旱高产型小麦品种 Alpowa 的旗叶 *CCI* 较高, 受干旱胁迫后增幅也较大。将 2 个处理同时进行相关性分析, 发现 *CCI* 仅与籽粒 *CID* 呈显著负相关 ( $P \leq 0.05$ ), 与产量无明显相关关系。在干旱处理下, *CCI* 表现为与 *CTA* 显著负相关 ( $P \leq 0.05$ ), 而与其他指标无明显相关; 在灌溉条件下, *CCI* 与任何指标均无明显相关。这表明在研究条件下开花期旗叶 *CCI* 与籽粒产量、*CID* 以及 *CT* 相关关系不稳定, 适宜替代 *CID* 进行抗旱品种的选育。

由此可知, 在干旱、灌水条件下, 籽粒 *CID* 均与产量呈 0.01 水平显著正相关, 因此籽粒 *CID* 是作为抗旱品种选育的良好指标。在干旱条件下, *CTF* 与籽粒 *CID* 显著负相关 ( $P \leq 0.05$ ), 可以作为替代籽粒 *CID* 的指标。在灌水条件下, *CTA* 和 *CTF* 均不能用来替代籽粒 *CID* 进行抗旱品种选育。旗叶 *CCI* 在 2 种处理下与 *CID* 均无明显相关, 故不宜用作籽粒 *CID* 的替代指标。

### 参考文献

- [1] 张正斌. 作物抗旱节水的生理遗传育种基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 55.
- [2] FARQUHAR G D, RICHARDS R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water use efficiency of wheat genotypes[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11: 539-552.
- [3] MERAH O, DELEENS E, MONNEVEUX P. Grain yield, carbon isotope discrimination, mineral and silicon content in durum wheat under different precipitation regimes[J]. Physiology Plant, 1999, 107: 387-394.

达、生产工艺的优化、生产成本的降低等问题作深入研究,那么纤维素酶的应用领域会更加广泛。这即是今后纤维素酶研究的主要目标和方向。

## 参考文献

- [1] MIZRACHI E, MANSFIELD S D, MYBURG A A. Cellulose factories: advancing bioenergy production from forest trees[J]. *New Phytol*, 2012, 194(1):54-62.
- [2] CARPITA N C. Update on mechanisms of plant cell wall biosynthesis; how plants make cellulose and other (1->4)-beta-D-glycans[J]. *Plant Physiol*, 2011, 155(1):171-184.
- [3] PETERSEN N, GATENHOLM P. Bacterial cellulose-based materials and medical devices; current state and perspectives[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2011, 91(5):1277-1286.
- [4] GEN KLAAS M R, SCHONE H. Direct, high-yield conversions of cellulose into biofuel and platform chemicals-on the way to a sustainable biobased economy[J]. *Chem Sus Chem*, 2009, 2(2):127-128.
- [5] 顾方媛, 陈朝银, 石家骥, 等. 纤维素酶的研究进展与发展趋势[J]. *微生物学杂志*, 2008, 28(1):83-86.
- [6] EVELEIGH DE, MANDELS M, ANDREOTTI R, et al. Measurement of saccharifying cellulase[J]. *Biotechnol Biofuels*, 2009, 2:21.
- [7] SANCHEZ C. Lignocellulosic residues. biodegradation and bioconversion by fungi[J]. *Biotechnol Adv*, 2009, 27(2):185-194.
- [8] 张小梅, 李单单, 王禄山, 等. 纤维素酶家族及其催化结构域分子改造的新进展[J]. *生物工程学报*, 2013, 29(4):422-433.
- [9] FRENCH A D. Combining computational chemistry and crystallography for a better understanding of the structure of cellulose[J]. *Adv Carbohydr Chem Biochem* 2012, 67:19-93.
- [10] BECKHAM G T, BOMBLE Y J, BAYER E A, et al. Applications of computational science for understanding enzymatic deconstruction of cellulose[J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2011, 22(2):231-238.
- [11] 颜霞, 柳晓东, 杨俊杰. 高温纤维素酶产生菌的筛选鉴定及其酶性质研究[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(6):787-791.
- [12] 张敬, 何伟宏, 唐蜀昆, 等. 云南干热环境可培养高温放线菌多样性及产纤维素酶活性评价[J]. *微生物学通报*, 2013, 40(6):1109-1120.
- [13] RANSOM-JONES E, JONES D L, MCCARTHY A J, et al. The fibrobacters: an important phylum of cellulose-degrading bacteria[J]. *Microb Ecol*, 2012, 63(2):267-281.
- [14] GUERRIERO G, FUGELSTAD J, BULONE V. What do we really know about cellulose biosynthesis in higher plants? [J]. *J Integr Plant Biol*, 2010, 52(2):161-175.
- [15] RUSSELL J B, MUCK R E, WEIMER P J. Quantitative analysis of cellulose degradation and growth of cellulolytic bacteria in the rumen[J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2009, 67(2):183-197.
- [16] ENDLER A, PERSSON S. Cellulose synthases and synthesis in *Arabidopsis*[J]. *Mol Plant*, 2011, 4(2):199-211.
- [17] WILSON D B. Microbial diversity of cellulose hydrolysis[J]. *Curr Opin Microbiol*, 2011, 14(3):259-263.
- [18] 卢敏, 王帅豪, 狄元冉, 等. 纤维素酶基因克隆与表达[J]. *动物营养学报*, 2012, 24(6):1013-1018.
- [19] 陶恒, 覃益民, 郑丽珍, 等. 产纤维素酶辅助蛋白菌种筛选及蛋白增效作用条件研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(10):5737-5738.
- [20] 宋朝霞. 微波-纤维素酶预处理对大豆低聚糖提取的影响[J]. *现代食品科技*, 2007, 23(1):33-35.
- [21] 吕景春, 杜丽萍. 纤维素酶在棉织物抛光工艺中的应用[J]. *纺织科技进展*, 2008(4):40-42.
- [22] 高树珍. 酸性纤维素酶在棉织物表面抛光中的应用[J]. *黑龙江纺织*, 2008(3):15-18.
- [23] 冯愈. 苕麻织物纤维素酶-混合多羧酸防皱整理[J]. *印染*, 2008(22):26-28.
- [24] 周文常. 纤维素酶对亚麻织物的生物抛光整理[J]. *纺织科技进展*, 2008(3):63-65.
- [25] 周娟, 杨焕民, 姜宁, 等. 纤维素酶对肉仔鸡生产性能和营养物质利用的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2007(3):42-43.
- [26] 吴桐忠. 秸秆中添加纤维素酶对羔羊增重效果的影响[J]. *新疆农垦科技*, 2008(6):35-36.
- [27] 王照忠, 尚有安. 纤维素复合酶对奶牛消化率影响的效果分析[J]. *养殖与饲料*, 2008(5):61-62.
- [28] 王平, 李长存. 纤维素复合酶对育肥绵羊增重效果的影响[J]. *现代农业科技*, 2008(20):238.
- [29] 高春生, 范光丽, 李建华, 等. 纤维素酶对草鱼生长性能和饲料消化率及体成分的影响[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(10):473-475.
- [30] 周学飞. 纸浆仿酶脱木素与漂白[J]. *中国造纸学报*, 2007(4):102-107.
- [4] SAYRE K, ACEVEDO E, AUSTIN R. Carbon isotope discrimination and grain yield for three bread wheat germplasm groups grown at different levels of water stress[J]. *Field Crops Research*, 1995, 41:45-54.
- [5] CONDON A G, RICHARDS R A. Broad sense heritability and genotype x environment interaction for carbon isotope discrimination in field grown wheat [J]. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1992, 43:921-934.
- [6] CONDON A G, FARQUAR G D, REBETZKE G J, et al. The application of carbon isotope discrimination in cereal improvement for water-limited environments [C]//Drought Adaptation in Cereals. Philadelphia: Haworth Press, 2006:171-219.
- [7] CONDON A G, REYNOLDS M P, REBETZKE G J. Using stomatal aperture-related traits to select for high yield potential in bread wheat [J]. *Wheat Production in Stressed Environments*, 2007, 12:617-642.
- [8] 逮芳芳, 李昌澎, 胡银岗. 小麦碳同位素分辨率与叶片气孔相关指标的关系[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(4):660-664.
- [9] 董建力, 许兴, 李树华, 等. 旱胁迫对不同春小麦叶绿素含量的影响及与抗旱性的关系[J]. *华北农学报*, 2011, 26(3):120-123.
- [10] 李树华, 白海波, 吕学莲, 等. 春小麦碳同位素分辨率与冠层温度的相关性研究[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(2):111-117.
- [11] LI P, CHEN J, WU P. Evaluation of grain yield and three physiological traits in 30 spring wheat genotypes across three irrigation regimes [J]. *Crop Science*, 2012, 52:110-121.
- [12] 李树华, 许兴, 张艳铃, 等. 小麦不同器官碳同位素分辨率与产量的相关性研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(23):121-125.
- [13] CONDON A G, RICHARDS R A, FARQUAR G D. Carbon isotope discrimination is positively correlated with grain-yield and dry-matter production in field-grown wheat[J]. *Crop Science*, 1987, 27:996-1001.
- [14] MERAH O, DELEENS E, MONNEVEUX P. Relationships between carbon isotope discrimination, dry matter production, and harvest index in durum wheat[J]. *Plant Physiology*, 2001, 158:723-729.
- [15] MERAH O, DELEENS E, SOUYRIS I, et al. Relationships between lag leaf carbon isotope discrimination and several morphophysiological traits in durum wheat under Mediterranean conditions[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2001, 45:63-71.
- [16] MERAH O, DELEENS E, SOUYRIS I, et al. Stability of carbon isotope discrimination and grain yield in durum wheat[J]. *Crop Science*, 2001, 41:677-682.
- [17] MERAH O, DELEENS E, TEULAT B, et al. Productivity and carbon isotope discrimination in durum wheat organs under a Mediterranean climate [J]. *Plantbiology and Pathology*, 2001, 324:51-57.
- [18] 张小妹. 水稻碳同位素分辨率与产量相关性及其 QTL 定位[D]. 武汉:华中农业大学, 2009.
- [19] REBETZKE G J, CONDON A G, RICHARDS R A, et al. Selection for reduced carbon isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat[J]. *Crop Science*, 2002, 42:739-745.
- [20] 樊廷录, 宋尚有, 徐银萍, 等. 旱地冬小麦灌浆期冠层温度与产量和水分利用效率的关系[J]. *生态学报*, 2007, 27(11):4491-4497.
- [21] 李升东, 王法宏, 司纪升, 等. 不同基因型冬小麦在两种栽培模式下蒸腾速率、光合速率和水分利用效率的比较研究[J]. *麦类作物学报*, 2007, 27(3):514-517.
- [22] JONES H G, STOLL M, SANTOS T, et al. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field; application to grapevine[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53:2249-2260.
- [23] 赵红梅, 郭程瑾, 段巍巍, 等. 小麦品种抗旱性评价指标研究[J]. *植物遗传资源学报*, 2007, 8(1):76-81.

(上接第 10569 页)