李素丽,史晓朋,李志刚,等. 持续自然降温对不同甘蔗品种形态及生理指标的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(20):98 - 103.
doi:10.15889/j.issn.1002 - 1302.2017.20.022

持续自然降温对不同甘蔗品种形态及生理指标的影响

李素丽[1,2], 史晓朋[1], 李志刚[1], 杨丽涛[1,2], 李杨瑞[2,3]
(1.广西大学农学院/亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室,广西南宁 530005;
2.亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室,广西南宁 530007;
3.广西农业科学院广西作物遗传改良生物技术重点开放实验室,广西南宁 530007)

摘要:为筛选耐寒优良甘蔗品种,在广西霜、雪、冰期最早、最长的县份之一的资源县,选用 8 个甘蔗品种进行试验,在甘蔗成熟期降温后期甘蔗受害最严重的时期采样,观察甘蔗在低温过程中的形态和生理变化,结合相关性检验,采用隶属函数法对 8 个甘蔗品种进行抗寒性综合评价。试验结果表明,不同甘蔗品种对长时间持续低温的反应各异,品种间茎的水渍状节数、绿叶数、锤度、糖分含量、茎尖褐变指数、叶绿素含量等指标均达差异明显。根据隶属函数法的分析结果,将供试品种划分为 3 级,其中Ⅰ级高抗寒型品种 2 个,Ⅱ级中抗寒型品种 2 个,Ⅲ级低抗寒型品种 4 个。由结果可知,甘蔗的抗寒能力存在着品种间差异,选择多个形态和生理化指标,采用隶属函数法,综合评估甘蔗工艺成熟期的抗寒性是可行的,可以较好地揭示指标性状与抗寒性的关系,为耐寒甘蔗品种筛选及生产提供参考依据。

关键词:甘蔗;抗寒性;形态;生理;隶属函数;抗寒性评价
中图分类号: S566.101　　**文献标志码:** A　　**文章编号:**1002 - 1302(2017)20 - 0098 - 06

甘蔗是喜温作物,种植于热带亚热带地区,需要适宜的温度、湿度才能正常生长。随着割手密等育种材料中抗逆基因的导入,甘蔗种植已从热带地区扩大到亚热带和温带地区[1]。我国近年来气候变化异常,出现极端最低气温,气候变化不稳定性增加,寒冷灾害更加严重,寒害和冷害使甘蔗生产和制糖工业生产受到严重阻碍,每年都会造成不同程度的经济损失[1-6],低温寒害严重影响甘蔗生产以及制糖工业和其他用糖企业的稳定发展。因此,研究甘蔗抗寒性对提高甘蔗抗寒能力具有重要的意义。

受冻害甘蔗主要表现为心叶先死亡呈黑色,然后是生长点死亡,叶片受害干枯呈灰白色,不能进行光合作用,蔗茎上部嫩芽受冻害后变为黑褐色,受冻害严重的蔗茎,组织全部或部分呈水渍状,节间有红褐色斑,有时节间开裂,蔗糖分逐渐水解,有酸腐味,茎内组织变质由上而下逐渐扩展,严重降低原料蔗品质[7-13],谭宗琨等将冻害对甘蔗的伤害症状分为重级、中级、轻级和基本正常 4 个等级[2,14]。

在甘蔗成熟期,比较容易遭受自然低温伤害的一般是在其生长期或成熟期,从而导致蔗茎呈水渍状,严重影响蔗糖生产。因此,研究甘蔗成熟期对低温的忍受能力及机制,针对不同冷敏感型甘蔗抗寒性的差异研究,选择抗寒性差异显著的品种为研究材料,对于寻求甘蔗抗寒育种理论上的突破与创新具有重要意义。本研究对 8 个不同甘蔗品种在持续自然降温后的形态和生理变化进行比较,再用隶属函数法对其抗寒性的强弱进行评价和排序,为深入研究甘蔗抗寒机制、品种推广以及常遭受寒害侵袭的蔗区选择栽培品种提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验区所在地资源县位于广西壮族自治区北部,地处 110°13′ ~ 110°54′E、25°48′ ~ 26°16′N 之间,属亚热带季风湿润气候区。由于地形地貌复杂,境内小气候多样,具有明显的山地气候特征。全县年均气温 16.4 ℃,年均降水量 1 761.1 mm,年均日照时数 1 307.6 h,年均无霜期 300 d,是广西霜、雪、冰期最早、最长的县份之一。试验地位于资源县城附近,土壤为栗钙土,土层深厚,土质肥沃,有灌溉条件。试验采取随机区组设计,3 次重复,单行区,行长 12 m,行距 1 m,小区面积 12 m^2。供试甘蔗于 2013 年 3 月 11 日种植,下种量为 16 芽/m,试验田的管理按照常规措施进行。

1.2　试验材料

共 8 个甘蔗品种,详见表 1。

1.3　取样时间和方法

于 2014 年 2 月 4 日(最低气温为 5.2 ℃)采样,每个品种随机选取 5 个生长一致的甘蔗,取 +1 叶(甘蔗最高可见肥厚带叶片)。

1.3.1　茎水渍状节数的计算　肉眼看到有水渍状现象的计算为产生水渍状节。

收稿日期:2017 - 03 - 28
基金项目:国家科技支撑计划(编号:2008BADB8B00);国家自然科学基金(编号:31460373);广西自然科学基金(编号:2011GXNSFA01806);广西科技攻关重点项目(编号:桂科攻 1222014 - 2B)。
作者简介:李素丽(1972—),女,广西上林人,博士,副教授,主要从事植物学研究。E - mail:lisuli88@163.com。
通信作者:李志刚,博士,教授,主要从事植物逆境生理研究。E - mail:lizhigangnn@163.com。

表 1　供试甘蔗品种名称和来源

供试品种	品种简称	来源
桂糖 28 号	GT28	中国广西
桂糖 21 号	GT21	中国广西
福农 15 号	FN15	中国福建
赣蔗 18 号	GAN18	中国江西
新台糖 22 号	ROC22	中国台湾
台糖 98/0432	TT98	中国台湾
园林 8 号	YL8	日本
园林 6 号	YL6	日本

1.3.2　甘蔗茎尖褐变指数的计算　根据茎尖颜色的深浅和组织软硬的程度,将甘蔗茎尖褐变程度用褐变指数表示,分为 5 级:0 级为生长点完好,颜色浅黄色,组织有一定硬度;1 级为生长点有轻微褐色,组织还有一定硬度;2 级为生长点有较深褐色,组织还有一定硬度;3 级为生长点深褐色并扩展到幼叶部位,组织变软;4 级为生长点深度褐变并扩展到幼叶和生长点以下幼茎部位,组织变软;5 级为生长点及幼叶和生长点以下幼茎深度褐变腐烂。

1.3.3　绿叶数的计算　肉眼观察叶片呈绿色,而且不萎蔫或干枯的部分为绿叶,整张叶片都是以上特征的计算为 1 张绿叶,有部分枯黄的叶片按绿色叶片占叶全长的比例计算绿叶数。

1.3.4　叶绿素含量的测定　用 SPAD－502 叶绿素测定仪测每个品种叶片中部叶绿素相对含量(SPAD 值)(SPADL)。

1.3.5　蔗汁锤度和甘蔗糖分含量的测定　按张笃思的方法[15]测定:蔗汁锤度用比重计法,甘蔗糖分含量用二次旋光法。

1.4　数据处理与分析

采用 Excel 和 SPSS 统计软件统计分析试验数据,参照张文娥等的方法[16－19],计算隶属函数值、平均隶属度,分析评价品种抗寒性。隶属函数公式如下:

$$\text{隶属函数} = (X_i - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min})。\quad (1)$$

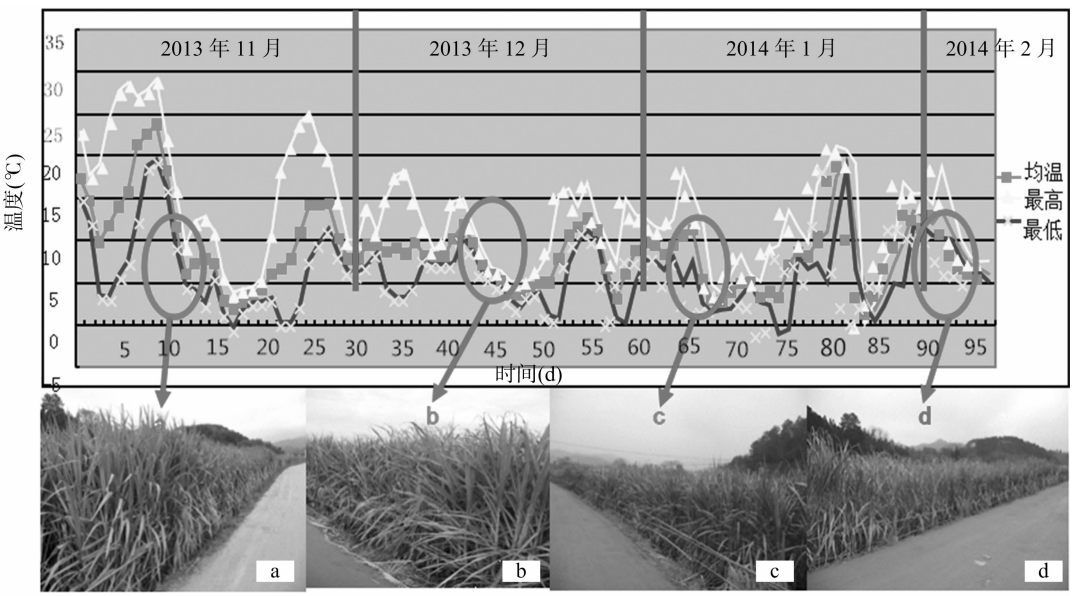
式中:X_i 为指标测定值,$X_{\min}$、$X_{\max}$分别为所有参试材料某一指标的最小值、最大值。如果某一指标与抗寒性呈负相关,则用反隶属函数进行转换:

$$\text{反隶属函数} = 1 - (X_i - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min})。\quad (2)$$

2　结果与分析

2.1　资源县气象资料和甘蔗田间生长情况

资源县相关气象资料显示,从 2013 年 11 月中旬开始降温,11 月 17 日受较强冷空气影响,出现雨夹雪天气,降温幅度较大,12 月中下旬又出现低温。2014 年 1 月初再次出现寒潮天气,一直持续低温,出现当年日最低温度－3 ℃(图 1)。降温前,甘蔗生长状况良好,叶片油绿(图 1－a),随着降温时间延长,甘蔗寒害程度加深,叶片枯黄(图 1－b～图1－d),其中 2014 年 2 月 4 日甘蔗严重受害,大部分叶片枯黄(图 1－d)。



气象资料来源于 2013 年 11 月—2014 年 1 月资源县气象站的记录;a—降温前甘蔗田间生长状态;b—2013 年 12 月 21 日甘蔗田间受害情况;c—2014 年 1 月 17 日甘蔗田间受害情况;d—2014 年 2 月 4 日甘蔗田间受害情况

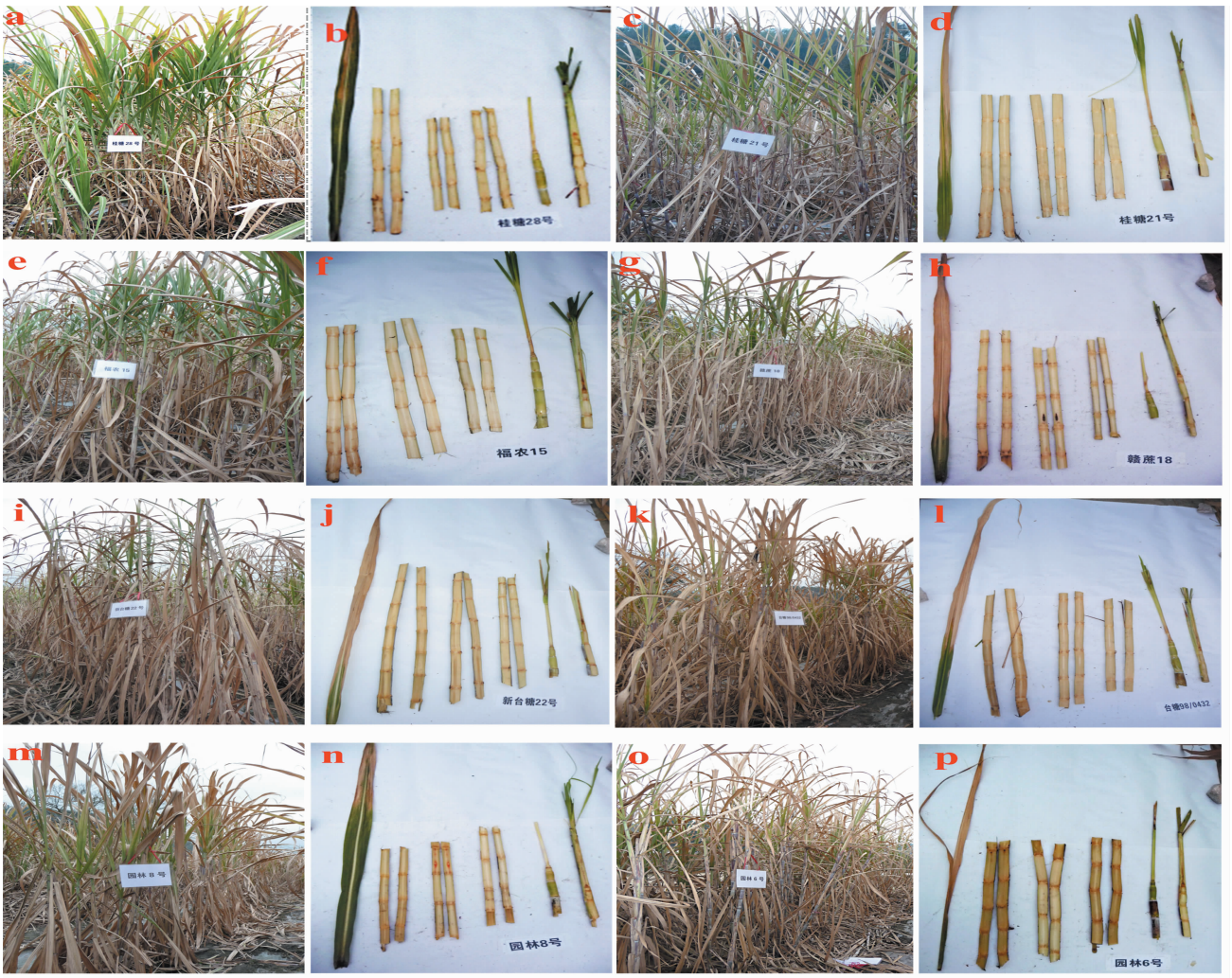
图1　广西资源县气象资料及 2013—2014年甘蔗生长情况

2.2　不同甘蔗品种的形态表现

在 2014 年 2 月,广西资源县已达到当地的最低气温－3 ℃,在种植的 8 个试验品种中,发现大部分甘蔗品种已严重受冷害,从图 2 可以看出,不同甘蔗品种的抗寒能力存在明显差异,受害较轻的品种,绿叶数多,茎无水渍状,茎尖无褐变现象;相反,受害较严重的品种,叶片枯黄,茎水渍状严重,茎尖褐变也严重。

2.3　不同甘蔗品种水渍状的差异

低温会导致甘蔗细胞结冰,细胞胀破死亡产生组织水渍状现象[20]。从图 3 可以看出,不同甘蔗品种在降温后期茎组织产生水渍状现象的严重程度有明显差异,本试验中不同甘蔗品种中产生水渍状现象的严重程度依次为 GT28 < GT21 < FN15 < GAN18 < ROC22 < TT98 < YL8 < YL6,其中 GT28 无一节茎有水渍状发生,水渍状现象最轻,甘蔗品味正常,无酒味;而 YL6 有 17 节产生严重的水渍状,水渍状现象最严重,占整个植株节数的 2/3 以上,并有严重的酒味。



a—桂糖 28 号田间植株形态；b—桂糖 28 号茎的纵剖面和+1 叶形态；c—桂糖 21 号田间植株形态；d—桂糖 21 号茎的纵剖面和+1 叶形态；e—福农 15 号田间植株形态；f—福农 15 号茎的纵剖面和+1 叶形态；g—赣蔗 18 号田间植株形态；h—赣蔗 18 号茎的纵剖面和+1叶形态；i—新台糖 22 号田间植株形态；j—新台糖 22 号茎的纵剖面和+1 叶形态；k—台糖 98/0432 田间植株形态；l—台糖 98/0432 茎的纵剖面和+1 叶形态；m—园林 8 号田间植株形态；n—园林 8 号茎的纵剖面和+1 叶形态；o—园林 6 号田间植株形态；p—园林 6 号茎的纵剖面和+1叶形态

图2　降温后期(2014年2月4日)不同甘蔗品种受寒害形态比较

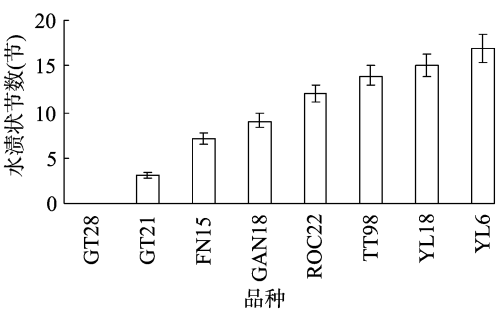


图3　持续自然降温后期不同甘蔗品种冷害后水渍状节数比较

2.4　不同甘蔗品种茎尖褐变指数的差异

低温下发生的组织褐变是由于冰晶的增大使细胞膜结构破坏而打破了细胞内酚－酚酶区域化分布后，酚、酚酶和氧相互接触，发生氧化褐变[21－23]。从图 4 可以看出，不同甘蔗品种在持续降温后期茎尖组织产生的褐变现象有明显差异，供试品种中产生水渍状现象的严重程度依次为 GT28 < GT21 < ROC22 < FN15 < GAN18 < TT98 < YL8 < YL6，其中 GT28 茎尖组织颜色与冷害前变化不大，即无褐变现象产生，而 YL6 最严重，茎尖褐变指数达 5 级，甚至有部分组织软化腐烂。

2.5　不同甘蔗品种绿叶数的差异

叶片主要进行光合和蒸腾作用，绿叶数越多，光合能力就越强[24]，绿叶数是鉴定植物抗寒性的重要指标之一[25]。从图 5 可以看出，降温后期品种间绿叶数达明显差异，供试品种绿叶数按多少排序依次为 GT28 > GT21 > GAN18 > FN15 > ROC22 > TT98 > YL8 > YL6。由图 6 可以看出，+1 绿叶占全叶的比例按高低排序依次为 GT28 > GAN18 > ROC22 > TT98 > GT21 > FN15 > YL8 > YL6，其中 GT28 绿叶数最多，有 5 张，+1 叶绿叶完整；而 YL6 最严重，无 1 张完整绿叶，+1 叶也几乎全部枯黄。

2.6　不同甘蔗品种叶绿素含量的差异

叶绿素含量是反映植物光合作用能力的间接指标，低温会导致叶绿素含量降低[26－27]。从图 7 可以看出，不同甘蔗品种在降温后期叶绿素含量有明显差异，供试品种中叶绿素含

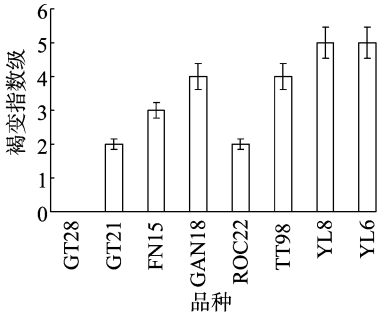


图4　持续自然降温后期不同甘蔗品种冷害后茎尖褐变指数程度比较

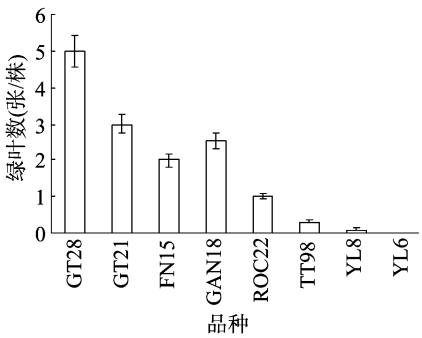


图5　冷害后不同甘蔗品种的绿叶数比较

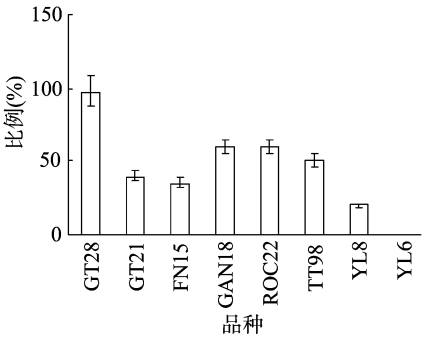


图6　冷害后+1叶绿叶占全叶比例

量按高低排序依次为 GT28 > GT21 > GAN18 > FN15 > ROC22 > TT98 > YL8 > YL6,其中 GT28 叶绿素含量最高,而 YL6 叶绿素含量最低。

2.7　不同甘蔗品种蔗汁锤度的差异

锤度是指可溶性固形物含量的百分比,植物中可溶性固形物含量高能增强细胞渗透势,降低细胞溶液的冰点[28]。从图 8 可以看出,不同的甘蔗品种在降温后期蔗汁锤度下降程度有明显差异,供试品种中锤度降低严重程度依次为 GT28 < GT21 < GAN18 < FN15 < ROC22 < YL8 < TT98 < YL6,其中 GT28 下降最低,而 YL6 下降最严重。

2.8　不同甘蔗品种蔗糖含量的差异

低温胁迫下细胞蔗糖的积累有和锤度相同的生理功能,蔗糖含量是植物抗寒性研究中普遍采用的抗寒性指标之一[29-30]。从图 9 可以看出,不同甘蔗品种在降温后期糖分含量下降程度有明显差异,不同甘蔗品种间差异明显,供试品种中蔗糖含量降低严重程度依次为 GT28 < GT21 < FN15 < GAN18 < ROC22 < YL8 < TT98 < YL6,其中 GT28 糖分含量下降最少,而 YL6 下降最严重。

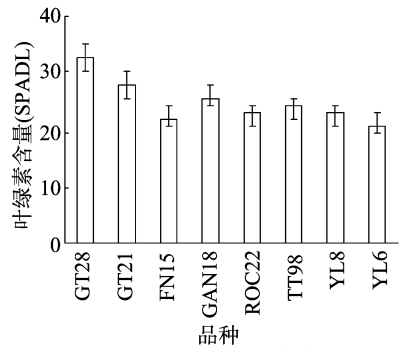


图7　冷害后不同品种叶绿素含量比较

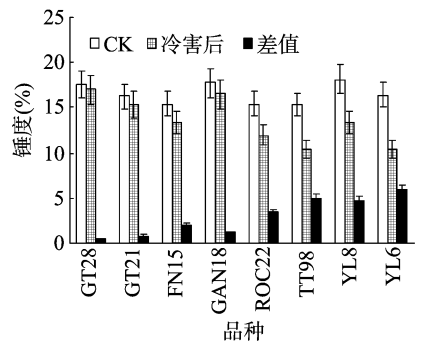


图8　持续自然降温后期不同甘蔗品种冷害后蔗汁锤度变化比较

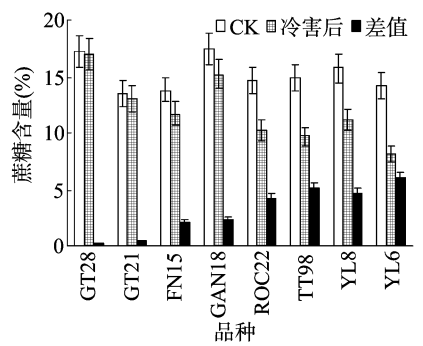


图9　持续自然降温后期(30 d)不同甘蔗品种蔗糖含量比较

2.9　不同抗寒指标的相关性

自然降温后不同甘蔗品种茎水渍状节数、茎尖褐变指数、绿叶数、+1 叶绿叶占全叶比例、叶绿素含量、锤度下降比例、蔗糖分下降比例等农艺性状均表现出不同程度的差异,不同指标之间的相关性见表 2。

从表 2 可以看出,茎水渍状节数与茎尖褐变指数、锤度下降比例、蔗糖下降比例呈极显著正相关,与绿叶数、+1 叶绿叶占全叶比例、叶绿素含量呈显著、极显著负相关;茎尖褐变指数与甘蔗锤度下降比例、蔗糖下降比例均呈显著正相关,与绿叶数、+1 叶绿叶占全叶比例、叶绿素含量呈极显著负相关。绿叶数与 +1 叶绿叶比例、叶绿素含量呈正相关,与锤度下降比例、蔗糖下降比例呈极显著负相关;叶绿素含量与锤度下降比例、蔗糖下降比例呈负相关,锤度下降比例与蔗糖分下降比例呈极显著正相关。茎水渍状节数是衡量低温伤害的比较直接的鉴定指标[5],分析结果表明,茎水渍状节数与其他指标呈负相关,起负面效应,该指标越高,抗寒性越低。叶绿素含量、绿叶数、+1 叶绿叶占全叶比例对甘蔗抗寒起正向作用,含量越高,甘蔗越抗寒;而茎尖褐变指数、锤度下降比例、蔗糖下降比例和茎水渍状节数之间呈明显正相关性。以上结果表明,低温胁迫对甘蔗的影响是多方面的,茎水渍状节数、茎尖褐变指数、绿叶数、+1 叶绿叶占全叶比例、叶绿素含量、锤度下降比例、蔗糖下降比例可作为不同甘蔗品种抗寒性鉴定的重要指标。

2.10　利用隶属函数评价甘蔗抗寒性

采用模糊数学中隶属函数法,以水渍状节数、茎尖褐变指数、绿叶数、+1 叶绿叶占全叶比例、叶绿素含量、锤度下降比例、蔗糖下降比例等 7 个农艺性状指标对 8 个甘蔗品种抗寒性进行综合评价,不同甘蔗品种的平均隶属度见表 3。参照前人研究方法[16-18]结合大田实际情况,按照平均隶属度将抗寒性分为 3 级,Ⅰ级:0.60 ~ 1.00,为高抗寒品种;Ⅱ级:0.30 ~ 0.59,为中抗寒品种;Ⅲ级:0 ~ 0.29,为低抗寒品种。8 个品种的耐寒能力大小依次为:GT28 > GT21 > FN15 > GAN18 > YL8 > TT98/0432 > ROC22 > YL6,其中桂糖 28 号最耐寒,园林 6 号最不耐寒。

3　讨论与结论

温度是植物生长发育过程中十分重要的生态因子,在低温环境中,植物形态和生理等方面都发生不同程度的改

表 2　不同甘蔗品种抗寒指标的相关性分析

指标	水渍状节数	茎尖褐变指数	绿叶数	+1 叶绿叶比例	叶绿素相对数量	锤度	蔗糖含量
水渍状节数	1.000						
茎尖褐变指数	0.841**	1.000					
绿叶数	−0.974**	−0.822**	1.000				
+1 叶绿叶比例	−0.741*	−0.825**	0.784*	1.000			
叶绿素相对数量	−0.911**	−0.837**	0.930**	0.805**	1.000		
锤度	0.937**	0.743*	−0.935**	−0.742*	−0.852	1.000	
蔗糖分含量	0.972**	0.765*	−0.945**	−0.896**	−0.896**	0.972**	1.000

注:“*”表示在 0.05 水平显著相关,“**”表示在 0.01 水平显著相关。

表 3　不同甘蔗品种抗寒性隶属函数分析

指标	GT28	GT21	FN15	GAN18	YL8	TT98	ROC22	YL6
水渍状节数	1	0.82	0.71	0.47	0.29	0.18	0.12	0
茎尖褐变指数	1	0.60	0.40	0.20	0.60	0.20	0.00	0
绿叶数	1	0.60	0.40	0.50	0.20	0.06	0.02	0
+1 叶绿叶比例	1	0.41	0.56	0.61	0.61	0.51	0.20	0
叶绿素相对数量	1	0.58	0.33	0.42	0.17	0.25	0.13	0
锤度	1	0.92	0.72	0.86	0.45	0.18	0.22	0
糖分含量	1	0.97	0.65	0.65	0.30	0.14	0.23	0
平均隶属函数	1	0.70	0.54	0.53	0.37	0.22	0.13	0
抗寒类型	高抗	高抗	中抗	中抗	低抗	低抗	低抗	低抗

注:ASF 代表函数值的算术平均值。

变[31-32]。本研究结果表明,持续自然降温后甘蔗形态和生理等发生很大变化,不同甘蔗品种茎的水渍状节数、茎尖褐变指数、绿叶数、叶绿素含量、锤度和蔗糖在冷害前和冷害后的差值均有明显差异,表明不同甘蔗品种受冷害的程度不一样,甘蔗抗寒能力存在品种间的差异。

组织呈水渍状的原因是由于温度低到冻结状态时细胞间隙的水分结冰,使细胞原生质的水分析出,冰块逐渐加大致使细胞脱水,或使细胞解离死亡而造成的[20,33]。组织水渍状的程度是鉴定植物抗寒性的重要指标之一[5]。本研究结果显示,自然降温后抗寒性较强的甘蔗品种桂糖 28 号、桂糖 21 号组织水渍状节数较少,其次为中抗品种叶片;而抗寒性较弱的甘蔗品种 ROC22、园林 8 号,园林 6 号水渍状严重。表明桂糖 28 号最耐寒,而园林 6 号最不耐寒。

组织褐变是植物细胞酚、酚酶、氧接触后产生的现象[21-23,34]。低温环境下,一方面超氧化物歧化酶(SOD)等一些清除自由基的酶活性下降,体内自由基产生和清除平衡受破坏,导致丙二醛的积累,破坏膜的结构[35];另一方面由于霜冻导致组织结冰,对细胞组织产生伤害,膜结构的破坏酚、酚酶和氧相互接触,发生氧化褐变[21,36]。组织褐变是细胞膜受伤的产物,其褐变程度是鉴定植物抗寒性的重要指标之一[37]。本研究结果显示,自然降温后抗寒性较强的甘蔗品种桂糖 28 号、桂糖 21 号组织褐变最少,其次为福农 15 号、赣蔗 18 号的叶片,而抗寒性较弱的甘蔗品种如园林 8 号,园林 6 号叶片组织褐变严重。

叶片是植物进行光合和蒸腾作用的器官。正常植物叶肉细胞中的叶绿体膜上分布着叶绿素 a 和叶绿素 b,所以叶片呈绿色。绿叶数越多,光合能力就越强。低温环境下,叶绿体膜受破坏,叶绿体解体,叶绿素被分解,叶片变黄,不能行使其正常的功能。植物中绿叶数是鉴定植物抗寒性的重要指标之一[25]。本研究结果显示,自然降温后抗寒性最强的甘蔗品种桂糖 28 绿叶数最多,其次是桂糖 21 号、福农 15 号和赣蔗 18 号;而抗寒性较弱的甘蔗品种如 ROC22、台糖 98/0432 和园林 8 号、园林 6 号绿叶数较少,其中园林 6 号的绿叶数最少。

叶绿素含量是反映植物光合作用能力的一个间接指标,叶绿体是植物体内冷敏感性很强的细胞器,长期低温会导致叶绿素的分解加快,叶绿素含量降低[38-41]。相关报道显示,叶片叶绿素含量是鉴定作物抗寒性的指标之一[26,42]。在本研究中,自然降温后期抗寒性较强的甘蔗品种桂糖 28 号、桂糖 21 的叶绿素含量较高;而抗寒性较弱的甘蔗品种如 ROC22、台糖 98/0432 和园林 8 号、园林 6 号含量较低。其中叶绿素含量最高的是桂糖 28 号,最低的是园林 6 号。

锤度是指可溶性固形物含量的比例,植物中可溶性固形物含量高能增强细胞渗透势,降低细胞溶液的冰点,还可缓冲细胞质过度脱水,从而减少逆境胁迫对细胞的伤害[28]。糖还能清除羟自由基,抵抗逆境的伤害,可溶性糖在低温胁迫下积累是各种植物的抗寒性研究中普遍采用的抗寒性指标[29-30]。本研究表明,甘蔗在自然降温后期,锤度和糖分含量大部分都降低,但不同的品种降低的幅度不一样,桂糖 28 号、桂糖 21、福农 15 和赣蔗 18 糖分含量降低幅度明显低于新台糖 22、台糖 98/0432 和园林 8 号、园林 6 号,其中降幅最低是桂糖 28 号,降幅最高的是园林 6 号。

低温对甘蔗的影响是复杂的,不仅表现在形态上,同时也表现在生理生化过程中。由于供试品种不同,蔗株对低温的适应能力各异。因此,在进行甘蔗品种抗寒性鉴定时,不能使用单一的指标,而应以多个指标综合评价。隶属函数法已经成功应用于葡萄[16]、玉米[17]、小麦[43]、苜蓿[18]、月季[19]、甘薯[44]等其他作物的抗逆性评价,并证明其对抗性筛选的可靠性。本研究综合前人的经验,将隶属函数分析法应用于自然

低温条件下的大田甘蔗抗寒性研究,应用多个形态和生理指标对不同甘蔗品种进行综合抗寒性评价,提高了评价的准确性,在理论和实践中都有一定的指导作用。

不同甘蔗品种对长时间持续低温的反应各异,本研究根据 7 个相关性状指标,运用隶属函数法的分析方法对供试的 8 个甘蔗品种成熟期的抗寒性进行综合评价,划分为 3 级,其中Ⅰ级高抗寒型品种 2 个,Ⅱ级抗寒型品种 2 个,Ⅲ级低抗寒型品种 4 个,其中桂糖 28 号抗寒性最强,园林 6 号抗寒性最弱。

参考文献:

[1]许文花,杨清辉. 甘蔗抗寒性研究进展[J]. 甘蔗,2003,10(3):8 -12.

[2]谭宗琨,黄城华,孟翠丽,等. 甘蔗寒冻害等级指标及灾损指标的初步研究[J]. 中国农学通报,2014,30(28):169 -181.

[3]李茂枝. 浅谈甘蔗抗寒性及防寒措施[J]. 中国糖料,1998(2):42 -45.

[4]陈能武,杨荣仲,吴才文. 甘蔗品种抗寒性鉴定技术研究[J]. 甘蔗糖业,1996(4):1 -9.

[5]张木清,陈如凯. 甘蔗抗寒性的研究——Ⅰ. 低温对甘蔗苗期生长的影响[J]. 福建省农科院学报,1992,7(1):14 -22.

[6]孟翠丽,谭宗琨,李紫甜. 广西甘蔗寒冻害空间反演模型研究[J]. 中国农业资源与区划,2016,37(6):15 -21,43.

[7]王鉴明. 中国甘蔗栽培学[M]. 北京:农业出版社,1985:292 -296.

[8]覃蔚谦. 从建国后数次冻害看今冬冻害甘蔗糖的损失[J]. 广西蔗糖,2000(1):14 -18.

[9]梁广焜. 甘蔗霜冻害及其防抗措施[J]. 甘蔗糖业,1994(6):7 -8.

[10]马　丽,王丽萍,蔡　青,等. 自然霜冻后甘蔗种质耐霜性鉴定[J]. 亚热带农业研究,2005,1(4):1 -4.

[11]Singh O,Ralham N. A review of low temperatures stress resistance in sugarcane[J]. Indian Sugar,1998,48(6):421 -430.

[12]柯仿钢. 甘蔗霜害识别与预防[J]. 农药信息市场,2012(7):51.

[13]谭宗琨,欧钊荣,何　燕. 广西蔗糖发展主要气象灾害分析及蔗糖产业优化布局的研究[J]. 甘蔗糖业,2006(1):17 -21,33.

[14]王鉴明,保国裕,陈景形. 对甘蔗的新认识[J]. 甘蔗糖业,1980(8):3 -7.

[15]张笃思. 甘蔗制糖工业分析[M]. 北京:中国轻工业出版社,1991:3 -42.

[16]张文娥,王　飞,潘学军. 应用隶属函数法综合评价葡萄种间抗寒性[J]. 果树学报,2007,24(6):849 -853.

[17]许桂芳,张朝阳,向佐湘. 利用隶属函数法对 4 种珍珠菜属植物的抗寒性综合评价[J]. 西北林学院学报,2009,24(3):24 -26.

[18]魏永胜,梁宗锁,山　仑,等. 利用隶属函数值法评价苜蓿抗旱性[J]. 草业科学,2005,22(6):33 -36.

[19]许　凤,张　颢. 杨春梅利用隶属函数值法评价月季耐寒性[J]. 西南农业学报,2012,25(5):1870 -1873.

[20]陈亚华,沈振国,刘友良. 低温、高 pH 胁迫对水稻幼苗根系质膜、液泡膜 ATP 酶活性的影响[J]. 植物生理学报,2000,26(5):407 -412.

[21]胡桂兵,陈大成,李　平,等. 荔枝果皮色素、酚类物质与酶活性的动态变化[J]. 果树科学,2000,17(1):35 -40.

[22]郁志芳,彭贵霞,夏志华,等. 鲜切山药酶促褐变机理的研究[J]. 食品科学,2003,24(5):44 -49.

[23]陈艳乐,申秀英,丁炳扬,等. 薯蓣多酚氧化酶特性及褐变控制[J]. 食品科学,2003,24(10):59 -62.

[24]王　忠. 植物生理学[M]. 2 版. 北京:中国农业出版社,2009:124 -125.

[25]焦雨歆,赵　琦,王雪英,等. 环境因子对植物叶绿体结构的影响[J]. 生物技术通报,2008(2):5 -10.

[26]马春平,宋丽萍,崔国文. 紫花苜蓿抗寒生理指标的此较研究[J]. 黑龙江畜牧兽医,2006(6):47 -48.

[27]李　进. 低温胁迫下水稻幼苗抗寒生理指标分析[J]. 安徽农学通报,2014,20(12):21 -22,68.

[28]利容千,王建波. 植物逆境细胞及生理学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002:160 -164.

[29]罗焕亮,徐位力,李建忠,等. 马占相思对低温胁迫适应性的研究[J]. 华南农业大学学报(自然科学版),2002,23(2):51 -53.

[30]刘丽杰,苍　晶,王军虹,等. 外源 ABA 对苗期低温下冬小麦蔗糖含量及其关键酶基因表达的影响[J]. 麦类作物学报,2015,35(10):1333 -1340.

[31]曹慧明,史作民,周晓波,等. 植物对低温环境的响应及其抗寒性研究综述[J]. 中国农业气象,2010,31(2):310 -314,319.

[32]Ren J,Huang Z L,Zeng L X,et al. A review of physiological reaction mechanism of plants exposed to low temperature stress[J]. World Forestry Research,2013,26(6):15 -20.

[33]周庆鑫. 低温下冬小麦活性氧清除物及膜脂组分对质膜稳定性影响的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014:6 -7.

[34]魏送送. 混浊梨汁酶促褐变机理及控制技术研究[D]. 西安:陕西科技大学,2014:55 -56.

[35]Stewart G R,Larher F,Miflin B J. Accumulation of amino acids and related compounds in relation to environmental stress[J]. Biochem Plant,1980,5:609 -635.

[36]薛楚然. 影响荔枝及荔枝酒酶促褐变的因素及控制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015:34 -35.

[37]姚　焱,刘向东,汪珍春,等. 低温预处理对水稻花药培养中花药壁褐变的结构影响[J]. 热带亚热带植物学报,2006,14(4):307 -311.

[38]王国莉,郭振飞. 水稻不同耐冷品种光呼吸对低温的反应[J]. 作物学报,2005,31(5):673 -676.

[39]陈　洁. 3 种含笑属植物抗寒性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2015.

[40]安飞飞,简纯平,杨　龙,等. 木薯幼苗叶绿素含量及光合特性对盐胁迫的响应[J]. 江苏农业学报,2015,31(3):500 -504.

[41]李春雷,倪德江. 氟对幼龄茶树叶绿素含量及抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业学报,2015,31(5):1149 -1153.

[42]陈　洁,金晓玲,宁　阳,等. 3 种含笑属植物抗寒生理指标的筛选及评价[J]. 河南农业科学,2016,45(2):113 -118.

[43]陈荣敏,杨学举,梁凤山,等. 利用隶属函数法综合评价冬小麦的抗旱性[J]. 河北农业大学学报,2002,25(2):7 -9.

[44]孙　凯,张胜利,朱弘博,等. 利用隶属函数法对不同基因型甘薯耐盐碱能力的分析与评价[J]. 东北师大学报(自然科学版),2015,47(2):115 -119.