

低温胁迫对不同基因型玉米幼苗的影响

张海娇, 邹原东, 李志强, 韩振芹 (北京农业职业学院, 北京 102442)

摘要 以不同基因型玉米品种郑单 958、京科 968、先玉 335、农大 108、京农科 728 和正大 615 为试验材料, 在玉米苗期进行低温胁迫, 分别在 0、2、4 d 采集玉米植株样品进行测定, 通过比较玉米幼苗株高、株重、丙二醛含量、脯氨酸含量以及可溶性糖含量的变化, 研究低温对不同基因型玉米幼苗的影响。结果表明, 在常温(25 ℃)和低温胁迫(5 ℃)的培养条件下, 京科 968 和京农科 728 的株高均高于先玉 335、郑单 958、正大 615 和农大 108, 其中京科 968 的株高显著高于其他基因型玉米幼苗。5 ℃低温胁迫条件下, 京科 968 和京农科 728 的株重显著高于先玉 335、郑单 958、正大 615 和农大 108。低温胁迫(5 ℃)0、2 和 4 d 条件下, 京科 968 和京农科 728 种子的丙二醛(MDA)含量和脯氨酸均低于其他基因型玉米幼苗, 可溶性糖含量在不同基因型玉米幼苗间呈相反趋势, 在低温胁迫 4 d 后优势更明显。在低温胁迫下, 京科 968、京农科 728 表现出较强的耐冷性, 该研究为解决目前玉米生产中遇到的低温冷害问题提供理论参考依据。

关键词 玉米幼苗; 低温胁迫; 耐冷性

中图分类号 S513 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)20-0048-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.20.013



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Low Temperature Stress on Seedlings of Different Genotypes Maize

ZHANG Hai-jiao, ZOU Yuan-dong, LI Zhi-qiang et al (Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing 102442)

Abstract Six widely planted maize varieties in China, including Jingke 968 (JK968), Jingnongke 728 (JNK728), Xianyu 335 (XY335), Zhengdan 958 (ZD958), Zhengda 615 (ZD615) and Nongda 108 (ND108) were used as materials. Low temperature stress was used in maize seedling stage. Plant samples were collected at 0, 2 and 4 d for determination. Experiment was conducted to study the effects of low temperature stress on the plant height, plant weight, proline content, malondialdehyde (MDA), soluble sugar content of maize seedlings. Under normal temperature (25 ℃) and low temperature stress (5 ℃), the plant height of JK968 and JNK728 were higher than those of XY335, ZD958, ZD615 and ND108. And JK 968 and JNK728 were significantly higher than those of other genotypes of maize seedlings. Plant weights of JK968 and JNK728 were significantly higher than those of XY335, ZD958, ZD615 and ND108 under 5 ℃. MDA and proline contents of JK968 and JNK728 seeds were lower than those of other genotypes of maize seedlings under low temperature stress for 0, 2 and 4 d. Soluble sugar content showed the opposite trend among different genotypes of maize seedlings, and the advantage was more obvious after 4 d of low temperature stress. JK968 and JNK728 showed the best cold tolerance under low temperature stress. The research results provided theoretical basis for solving the cold injury problems encountered in maize production.

Key words Maize seedlings; Low temperature stress; Cold resistance

玉米(*Zea mays* L.)是世界上种植最广泛的作物之一, 同时在粮食、饲料和工业等方面也发挥着重要作用, 其生长情况与环境因子息息相关^[1]。玉米是典型的低温敏感型作物^[2], 近些年来, 玉米生产中的低温冷害等极端天气频发, 尤其是在北方春玉米播种区, 玉米出苗期间遭遇低温冷害经常导致玉米出现萌发缓慢、整齐度差、幼苗长势弱等现象, 甚至造成死亡, 这已成为限制玉米产量和品质的主要环境因子之一^[3-4]。长期以来, 前人对低温胁迫对玉米幼苗的影响进行了大量的研究, 许勇等^[5]研究发现, 低温处理 8 d 后对西瓜幼苗的丙二醛含量进行测定, 结果表明对低温较敏感的西瓜幼苗其丙二醛含量上升幅度明显高于抗冷西瓜幼苗, 对低温较敏感的西瓜幼苗丙二醛含量约是抗冷西瓜幼苗的 2 倍。但是目前 MDA 含量的变化与低温胁迫时间的相关性也存在不同说法^[6]。植物在低温胁迫等逆境条件下, 脯氨酸含量往往有明显积累, 研究表明低温可以明显地增加玉米体内的脯氨酸含量^[7]。在低温胁迫条件下, 脯氨酸可以作为植物体内的渗透调节物质起到维持细胞结构、防止细胞脱水以及调节细胞氧化还原反应等作用, 从而使植物具有一定的耐冷性^[8]。可溶性糖是低温胁迫条件下植物体内呼吸作用的底物之一,

可溶性糖含量的积累可以增加细胞持水组织中的非结冰水, 降低细胞质的结冰温度, 从而保护细胞质胶体不会遇冷而凝固, 因此可溶性糖的含量与植物的抗寒性呈正相关关系^[9]。鉴于此, 笔者以近几年我国玉米生产的主推品种为研究对象, 研究低温胁迫下玉米幼苗的生长特性和生理特性, 以期寻求提高玉米抗冷性的高效、经济与实用的方法, 为玉米的生产提供理论参考和指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料 供试基因型玉米分别为郑单 958(ZD958)、京科 968(JK968)、先玉 335(XY335)、农大 108(ND108)、京农科 728(JNK728)、正大 615(ZD615)。

1.2 试验设计 分别将籽粒饱满、无病斑的供试玉米种子放在 75%乙醇中浸泡 10 s, 继而用 5%次氯酸钙溶液消毒 10 min, 蒸馏水反复冲洗 3 遍后, 将种子置于培养皿中, 放于 25 ℃恒温培养箱内催芽。将萌发后的玉米种子播在装有草炭土的育苗盆中, 置于光照培养箱中培养, 日温/夜温控制在 25 ℃/18 ℃, 光照强度为 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光照时间为 12 h/d。待玉米幼苗长到 3 片叶子后, 进行低温处理, 日温/夜温控制在 5 ℃, 光照强度白天为 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 晚上为 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光照时间 12 h/d。低温胁迫后分别在 0、2、4 d 进行试验测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 株高测定。 随机测定 5 株玉米苗期株高, 从根部以上

基金项目 北京农业职业学院院级项目(XY-NF-18-01)。

作者简介 张海娇(1988—), 女, 黑龙江双鸭山人, 讲师, 硕士, 从事作物种质资源创新与利用研究。

收稿日期 2021-03-11

到幼苗生长点,求平均值。

1.3.2 重量测定。利用电子天平测量玉米幼苗鲜重。

1.3.3 丙二醛(MDA)含量测定。采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量^[10]。

1.3.4 脯氨酸含量测定。采用酸性茚三酮法测定脯氨酸含量(Pro)^[10]。

1.3.5 可溶性糖含量测定。采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[9]。

1.4 数据处理与分析方法 采用 Excel 2010 进行数据计算和绘图;采用 SPSS 25 软件进行数据分析及处理。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫下不同基因型玉米幼苗株高的比较 由表 1 可知,在 25 ℃ 下,不同基因型玉米品种间株高存在较大差异,京科 968 的株高显著高于其他基因型玉米幼苗,其中京科 968 的株高较京农科 728、先玉 335、郑单 958 和正大 615 分别高 12.02%、12.02%、16.15%、17.48%。低温处理 4 d 后,各基因型玉米幼苗株高有所上升,其中京科 968 和京农科 728 的株高显著高于先玉 335、郑单 958、农大 108 和正大 615。正大 615 株高增加较小,且株高显著低于京科 968、京农科 728、先玉 335 玉米幼苗,说明低温胁迫对正大 615 株高有显著影响,在低温条件下京科 968 和京农科 728 表现出更强的耐低温萌发能力。

表 1 低温胁迫对不同基因型玉米幼苗株高的影响

Table 1 Effects of low temperature stress on plant height of maize seedlings cm

品种名称 Variety name	25 ℃	5 ℃
先玉 335 Xianyu 335	36.6±0.6 b	43.3±1.8 b
京农科 728 Jingnongke 728	36.6±0.1 b	44.4±2.0 a
农大 108 Nongda 108	31.6±0.4 c	34.3±2.9 c
京科 968 Jingke 968	41.0±2.7 a	47.1±1.3 a
郑单 958 Zhengdan 958	35.3±0.3 b	37.8±2.1 c
正大 615 Zhengda 615	34.9±1.3 b	35.4±1.4 c

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercases in the same column indicated significant differences at 0.05 level

2.2 低温胁迫下不同基因型玉米幼苗株重的比较 由表 2 可知,在 25 ℃ 下,京科 968、京农科 728、先玉 335、郑单 958 的株重差异不显著,农大 108 的株重显著低于其他基因型玉米幼苗。低温处理 4 d 后,各玉米品种株重均有所增加,京科 968 的株重较京农科 728、先玉 335、郑单 958、正大 615 和农大 108 分别高 28.30%、36.00%、44.68%、44.68% 和 58.14%。由此说明,在低温条件下京科 968 较其他基因型玉米幼苗具有更强的耐低温能力。

2.3 低温胁迫下不同基因型玉米幼苗 MDA 含量比较 由图 1 可知,随着低温胁迫时间的增加,参试基因型玉米幼苗的 MDA 含量均呈逐渐升高趋势。其中,京科 968 和京农科 728 幼苗的 MDA 含量均低于其他基因型玉米幼苗。京科 968 在低温胁迫 4 d 后 MDA 含量平均较先玉 335、郑单 958、正大 615 和农大 108 分别低 20.41%、16.43%、27.78% 和

35.36%,京农科 728 在低温胁迫 4 d 后 MDA 含量较先玉 335、郑单 958、正大 615 和农大 108 分别低 13.61%、9.29%、21.60% 和 29.83%。农大 108 的 MDA 含量增加幅度最显著,增加了 0.83 μmol/g,正大 615、先玉 335、郑单 958 次之,京农科 728 和京科 968 的 MDA 含量增加较小,说明农大 108 的耐冷性较弱,京农科 728、京科 968 的耐冷性较好。

表 2 低温胁迫对不同基因型玉米幼苗株重的影响

Table 2 Effects of low temperature stress on plant weight of maize seedlings g

品种名称 Variety name	25 ℃	5 ℃
先玉 335 Xianyu 335	0.44±0.04 a	0.50±0.05 b
京农科 728 Jingnongke 728	0.47±0.05 a	0.53±0.04 b
农大 108 Nongda 108	0.41±0.08 b	0.43±0.04 c
京科 968 Jingke 968	0.53±0.04 a	0.68±0.03 a
郑单 958 Zhengdan 958	0.42±0.01 a	0.47±0.03 b
正大 615 Zhengda 615	0.42±0.09 a	0.47±0.07 b

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercases in the same column indicated significant differences at 0.05 level

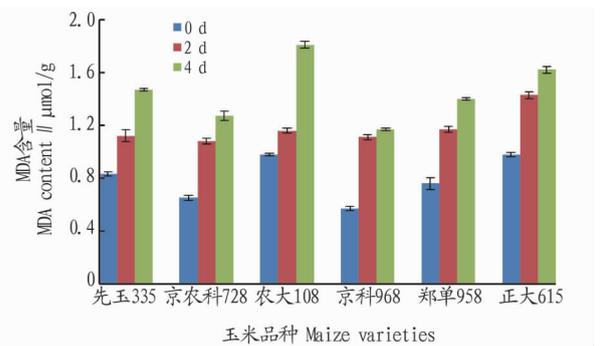


图 1 低温胁迫下不同基因型玉米幼苗 MDA 含量的变化

Fig.1 Changes of low temperature stress on the MDA content of maize seedlings

2.4 低温胁迫下不同基因型玉米幼苗脯氨酸含量比较 由图 2 可知,随着低温胁迫时间的增加,不同基因型玉米幼苗脯氨酸含量呈增加趋势,且差异显著,增加幅度依次为农大 108>正大 615>郑单 958>先玉 335>京农科 728>京科 968。在低温胁迫 2、4 d 时,京科 968 和京农科 728 的脯氨酸含量均低于其他基因型玉米幼苗,尤其在低温胁迫 4 d 时优势更明显。其中,京科 968 的脯氨酸含量较先玉 335、郑单 958、正大 615 和农大 108 分别低 20.71%、24.74%、27.60% 和 36.51%,京农科 728 的脯氨酸含量较先玉 335、郑单 958、正大 615 和农大 108 分别低 2.92%、7.85%、11.35% 和 22.25%,说明农大 108 的耐冷性较差,京农科 728、京科 968、先玉 335 的耐冷性较好。

2.5 低温胁迫下不同基因型玉米幼苗可溶性糖含量比较 由图 3 可知,在低温胁迫条件下,不同基因型玉米幼苗的可溶性糖含量随处理天数的增加呈升高趋势,且差异显著,京科 968、郑单 958 的可溶性糖含量增加幅度最明显,京农科 728、先玉 335 和正大 615 次之,农大 108 的可溶性糖含量增加幅度最小。其中,在低温胁迫 4 d 后,京科 968 的可溶

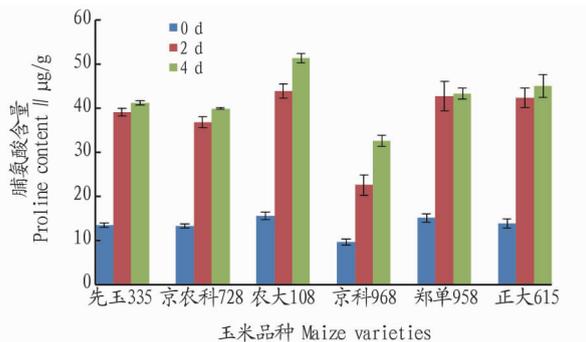


图2 低温胁迫下不同基因型玉米幼苗脯氨酸含量的变化

Fig.2 Changes of low temperature stress on the proline content of maize seedlings

性糖含量较先玉335、郑单958、正大615和农大108分别高8.26%、10.18%、10.67%和11.66%，京农科728的可溶性糖含量较先玉335、郑单958、正大615和农大108分别高3.48%、5.31%、5.78%和6.73%。因此，农大108受低温影响显著，而京科968、京农科728、郑单958的耐冷性较好。

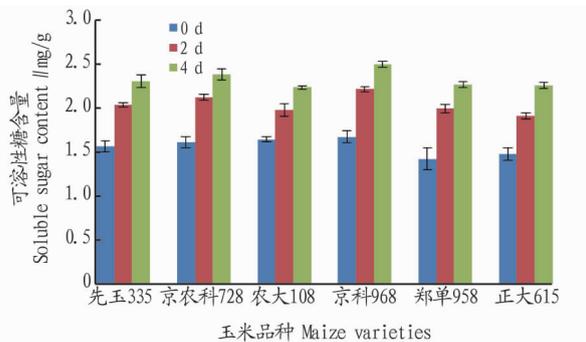


图3 低温胁迫下不同基因型玉米幼苗可溶性糖含量的变化

Fig.3 Changes of low temperature stress on the soluble sugar content of maize seedlings

3 结论与讨论

温度是影响玉米种子萌发的重要因素之一^[11-12]。低温胁迫对玉米苗期的植株叶片和根系生长发育影响较大^[13]。杨德光等^[14]研究认为，低温胁迫降低幼苗株高、地上部及地下部干鲜重。该研究发现，与25℃培养条件相比，6个参试玉米品种在低温胁迫条件下的株高及株重均受到影响，不同基因型间，京科968和京农科728的株高和株重均高于其他品种，尤其在5℃低温胁迫条件下优势更为显著。丙二醛是植物在逆境胁迫条件下产生的一种对自身有害的物质，因此玉米幼苗在逆境条件下，细胞膜结构与功能遭到破坏，代谢功能失去平衡，活性氧在植株体内大量积累，使得细胞脂过氧化作用不断增强。该研究中，随着低温胁迫时间的延长，参试基因型玉米幼苗的丙二醛含量均呈明显上升趋势。其中，京科968和京农科728幼苗的丙二醛含量均低于其他基因型玉米幼苗，农大108的MDA含量增加幅度最显著，正大615、先玉335、郑单958次之，京农科728和京科968的MDA浓度增加较小，这与对辣椒、夏威夷椰子等的研究结果一致^[15-16]。脯氨酸具有调节植物细胞内的渗透平衡，稳定原生质胶体及组织内的代谢过程，防止细胞脱水，并能增加植物

对逆境的适应性作用，因此是植物体内最有效的渗透调节物质之一^[17]。脯氨酸作为植物体内的一种游离氨基酸对低温比较敏感，前人对于玉米苗期进行低温处理后，发现脯氨酸含量逐渐增加^[18]，这与该试验所得的结论相同。低温胁迫后玉米幼苗淀粉含量下降，维持渗透势的糖类增加，从而增强玉米幼苗的抗冻性^[19]。前人研究发现，作为众多植物的呼吸作用底物，植物体内的可溶性糖含量在低温胁迫条件下会显著增加^[20-21]。该试验中，随着低温胁迫时间的延长，参试玉米幼苗的可溶性糖含量显著增加；在低温胁迫4d后，京科968的可溶性糖含量较先玉335、郑单958、正大615和农大108分别高8.26%、10.18%、10.67%和11.66%，京农科728的可溶性糖含量较先玉335、郑单958、正大615和农大108分别高3.48%、5.31%、5.78%和6.73%。总之，植物在低温胁迫下的表现是多方面的，因此研究玉米幼苗耐冷性时应该根据多个指标综合衡量，该试验人工模拟低温条件来研究玉米的耐冷性，只能初步判断外源物质对玉米耐寒性的影响，而且试验材料准备较少，因此最准确的变化趋势仍有待进一步研究。

在低温逆境条件下，对不同基因型玉米幼苗的农艺性状及生理指标的测定结果表明，低温胁迫显著抑制不同基因型玉米幼苗的生长，抑制幼苗株高和株重，促进玉米幼苗MDA、脯氨酸和可溶性糖含量的增加。随着低温胁迫时间的延长，不同基因型玉米幼苗各个测定指标的变化量差异显著。可以初步判定不同基因型玉米幼苗对低温胁迫的耐受性存在较大差异，在同等低温胁迫条件下不同基因型玉米幼苗耐冷性关系为京科968、京农科728耐冷性最优，先玉335、郑单958、正大615次之，而农大108的耐冷性较弱。

参考文献

- [1] GONG F, YANG L, TAI F, et al. "Omics" of maize stress response for sustainable food production: Opportunities and challenges [J]. *OMICS: A journal of integrative biology*, 2014, 18(12): 714-732.
- [2] 褚力嘉, 曹士亮, 靳羽晗, 等. 玉米萌发期耐冷性鉴定研究[J]. *种子*, 2020, 39(1): 36-41.
- [3] 王洪刚, 李丹, 李杨. 温度对玉米种子发芽及苗期生长的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2008(1): 37-39.
- [4] 魏锋, 唐振海, 马毅, 等. 农业隐性灾害对玉米生产的影响与对策[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(10): 116-118, 120.
- [5] 许勇, 张海英, 康国斌, 等. 西瓜野生种质幼苗耐冷性的生理生化特性与遗传研究[J]. *华北农学报*, 2000, 15(2): 67-71.
- [6] 沈文云, 侯锋, 吕淑珍, 等. 低温对杂交一代黄瓜幼苗生理特性的影响[J]. *华北农学报*, 1995, 10(1): 56-59.
- [7] 关贤文, 欧阳西荣. 玉米低温冷害研究进展[J]. *作物研究*, 2004, 18(S1): 353-357.
- [8] 王荣富. 植物抗寒指标的种类及其应用[J]. *植物生理学通讯*, 1987, 23(3): 49-55.
- [9] 江福英, 李延, 翁伯琦. 植物低温胁迫及其抗性生理[J]. *福建农业学报*, 2002, 17(3): 190-195.
- [10] 李合生. *植物生理生化实验原理和技术*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [11] 赵永锋, 韩静静, 贾晓艳, 等. 低温胁迫对不同玉米种子萌发的影响[J]. *种子*, 2019, 38(5): 86-89.
- [12] 徐婷, 樊景胜, 连永利, 等. 低温对高纬度半干旱区玉米主栽品种种子萌发特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(9): 25-27.
- [13] 吕天放, 徐田军, 刘月娥, 等. 低温胁迫对不同基因型玉米种子萌发特性的影响[J]. *玉米科学*, 2018, 26(6): 45-49.
- [14] 杨德光, 孙玉琚, ALI RAZA IRFAN, 等. 低温胁迫对玉米发芽及幼苗生理特性的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2018, 49(5): 1-8, 44.

续表 4

序号 No.	科名 Family name	种名 Species name	拉丁名 Latin name	濒危类型 Endangered type	保护级别 Protection level
11	兰科	见血青	<i>Liparis nervosa</i> (Thunb.ex A.Murray) Lindl.	渐危种	国家 II 级
12	猕猴桃科	毛花猕猴桃	<i>Actinidia eriantha</i> Benth.	渐危种	国家 II 级
13	猕猴桃科	阔叶猕猴桃	<i>Actinidia latifolia</i> (Gardn.et Champ.) Merr.	稀有种	国家 II 级
14	猕猴桃科	小叶猕猴桃	<i>Actinidia lanceolata</i> Dunn	稀有种	国家 II 级
15	木兰科	鹅掌楸	<i>Liriodendron chinense</i> (Hemsl.) Sarg.	稀有种	国家 II 级
16	三尖杉科	三尖杉	<i>Cephalotaxus fortunei</i> Hooker	渐危种	
17	桑科	白桂木	<i>Artocarpus hypargyreus</i> Hance	濒危种	
18	薯蓣科	福州薯蓣	<i>Dioscorea futschauensis</i> Uline ex R.Knuth	渐危种	
19	天南星科	花蘑芋	<i>Amorphophallus konjac</i> K.Koch	渐危种	
20	五加科	变叶树参	<i>Dendropanax brevistylus</i> (Champ.) Benth.	稀有种	
21	银杏科	银杏	<i>Ginkgo biloba</i> L.	稀有种	国家 I 级
22	樟科	樟	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl	渐危种	国家 II 级

3 讨论

该普查共完成样地 40 个,样方套 195 个,样方 1 170 个,采集标本 2 000 余份,经鉴定,涵江区共有药用植物 136 科 375 属 525 种,其中蕨类植物 35 种,占总物种的 6.66%;裸子植物 13 种,占 2.48%;被子植物 477 种,其中单子叶植物 54 种,双子叶植物 423 种,分别占总物种的 10.29% 和 80.57%。涵江区野生药用植物资源丰富,重点品种 49 种,特别是对叶百部、金毛狗脊、枫香树、草珊瑚、金樱子、两面针、朱砂根等资源极为丰富,具有良好的开发利用价值。野生药用植物资源中,菊科及豆科植物较多,为涵江区明显的优势种群。

涵江区属典型南亚热带海洋性气候,受海洋和山区地形的双重影响,夏无酷暑,冬无严寒,终年温暖,雨量充沛,适宜的环境使得涵江区生物多样性丰富。但由于地势复杂,山高坡陡,对其开发利用程度较低,目前仅庄边镇吉云村、新县镇白云村、庄边镇凤际村等少数村镇有药材种植基地,且种植规模不大,专业化程度较低。涵江区珍贵古树名木保护程度较高,有资料显示,涵江区有古树名木 684 株,分属 23 科 31 属 37 种,均为国家重点保护珍稀植物^[12]。该调查的涵江区药用植物入药部位多样,主要包括全草、根茎、叶类入药;药用功效主要包括清热解毒、消肿止痛、活血散瘀等。

总体来说,涵江区药用植物资源丰富,但开发利用较低,境内相应产业化企业相对较少,不成规模。同时境内仅有老

鹰尖自然保护区和瑞云山风景区 2 个自然保护区,对野生植物的保护开发不够。今后相关部门应加强涵江区野生植物资源保护工作,同时对境内蕴藏量相对较高的野生药用植物进行引种驯化,逐渐形成规模企业,提高涵江区药用植物的开发利用。

参考文献

- [1] 刘萍,马宏伟,王掌军.我国药用植物种质资源遗传多样性及其研究进展[J].农业科学研究,2008,29(3):66-70.
- [2] 黄璐琦,王永炎.全国中药资源普查技术规范[M].上海:上海科学技术出版社,2015.
- [3] 黄璐琦,陆建伟,郭兰萍,等.第四次全国中药资源普查方案设计与实施[J].中国中药杂志,2013,38(5):625-628.
- [4] 杨成祥,吴锦忠,范世明,等.福建省药用植物资源调查实施方案探讨[J].福建中医学院学报,2010,20(2):19-21.
- [5] 马卫峰,孙冠楠,张小波,等.中药资源普查野外数据采集系统设计与实现[J].中国现代中药,2013,15(10):823-826.
- [6] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,2004.
- [7] 福建省科学技术委员会.福建植物志[M].福州:福建科学技术出版社,1995.
- [8] 福建省医药研究所.福建药物志[M].福州:福建人民出版社,1979.
- [9] 国家中医药管理局《中华本草》编委会.中华本草[M].上海:上海科学技术出版社,1999.
- [10] 国家林业局野生动植物保护与自然保护管理司,中国科学院植物研究所.中国珍稀濒危植物图鉴[M].北京:中国林业出版社,2013.
- [11] 国家重点保护野生植物名录(第一批)[J].植物杂志,1999(5):4-11.
- [12] 阮晓霞.福建省莆田市涵江区古树名木现状调查分析与保护对策[J].北京农业,2014(15):263-264.

(上接第 50 页)

- [15] 邹志荣,陆福一.低温对辣椒幼苗膜脂过氧化和保护酶系统变化的影响[J].西北农业学报,1994,3(3):51-56.
- [16] 杨盛昌,谢潮添,张平等.冷锻炼对低温胁迫下夏威夷椰子膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J].植物资源与环境学报,2002,11(4):25-28.
- [17] 潘瑞焱,董愚得.植物生理学[M].3 版.北京:高等教育出版社,2000:218-328.

- [18] 王连敏,王立志,张国民,等.苗期低温对玉米体内脯氨酸、电导率及光合作用的影响[J].中国农业气象,1999,20(2):28-30.
- [19] 郝小琴,姚鹏鹤,高峰荣,等.低温胁迫对微胚乳超甜超高油玉米耐寒性生理生化特性的影响[J].作物学报,2014,40(8):1470-1484.
- [20] 王孝宣,李树德,东惠茹,等.番茄品种耐寒性与 ABA 和可溶性糖含量的关系[J].园艺学报,1998,25(1):56-60.
- [21] 刘祖祺,张石城.植物抗性生理学[M].北京:中国农业出版社,1994:14,43-44.