

网络出版时间:2018-01-10 16:16

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.04.014

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180110.1615.028.html

青花菜种质资源苗期耐涝性综合鉴定及评价

高 旭,张志仙,朱长志,檀国印,何道根

(台州市农业科学研究院,浙江 临海 317000)

【摘 要】【目的】筛选耐涝的青花菜种质资源,获得能快速鉴定青花菜耐涝性的主要指标。【方法】选用 19 份不同的青花菜作为供试材料,待幼苗长至三叶一心时进行淹水处理,淹水高于根基 1 cm 处,以常规水分管理为对照。淹水胁迫 10 d 后测定幼苗的地上干鲜质量、地下干鲜质量、株高、不定根数和可溶性糖、可溶性蛋白质、丙二醛(MDA)含量及过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性 11 个生理生化指标,分析各指标间的相关性。以耐涝系数作为评价指标,基于主成分分析及聚类分析,对 19 份青花菜材料进行耐涝性综合评定及各耐涝相关指标的筛选。【结果】通过 11 个生理生化指标综合评价可知,炎秀、台绿 3 号和优秀为耐涝的种质资源。通过主成分分析,可从 11 个耐涝指标中提取出地下鲜质量、超氧化物歧化酶(SOD)、可溶性糖含量、株高、不定根数以及丙二醛含量 6 个快速鉴定青花菜苗期耐涝性的指标。各材料综合因子得分(Y 值)经聚类分析后,在欧式距离为 5 时,可将 19 份不同青花菜材料按照耐涝性强弱归为 3 大类。【结论】筛选出了耐涝的青花菜种质资源,确定了鉴定其耐涝性的指标。

【关键词】青花菜;耐涝性;苗期;种质资源;主成分分析;聚类分析

【中图分类号】S635.3

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2018)04-0117-11

Comprehensive identification and evaluation of waterlogging tolerance during seedling stage of broccoli germplasms

GAO Xu, ZHANG Zhixian, ZHU Changzhi, TAN Guoyin, HE Daogen

(Taizhou Academy of Agricultural Sciences, Linhai, Zhejiang 317000, China)

Abstract: 【Objective】 This study screened waterlogging-tolerant germplasms of broccoli and obtained major indexes for rapid identification of waterlogging tolerance. 【Method】 A total of 19 different broccoli materials were treated by waterlogging stress overtopping 1 cm of the root when the broccoli seedling was in three leaves and one half period. After 10 days, 11 physiological and biochemical indexes including shoot dry weight, shoot fresh weight, underground dry weight, underground fresh weight, plant height, adventitious root number, soluble sugar content, soluble protein content and MDA content were measured and the correlations among them were analyzed. The comprehensive evaluation and classification of each index relating with waterlogging tolerance were conducted based on principal component analysis and cluster analysis using waterlogging tolerance coefficient as evaluation index. 【Result】 Yanxiu, Tailü No. 3 and Youxiu were identified as waterlogging-tolerant germplasm resources by comprehensive evaluation based on 11 physiological and biochemical indexes. The indexes were classified into 6 component factors by principal component analysis. The 19 different materials were clustered into 3 groups based on comprehensive factor scores (Y-value) at the Euclidean distance of 5. 【Conclusion】 This study screened waterlogging-tolerant germ-

【收稿日期】 2017-03-03

【基金项目】 浙江省农业(蔬菜)新品种选育重大科技专项(2016C02051-5-2);浙江省重点创新团队项目(2013TD05);浙江省重大科技专项(2014C02006);台州市农业重大专项(14ZD05);台州市重点科技创新团队项目(2014-1)

【作者简介】 高 旭(1988—),男,浙江宁波人,硕士,主要从事青花菜新品种选育研究。E-mail:gx003881@163.com

【通信作者】 何道根(1971—),男,浙江临海人,副研究员,主要从事青花菜新品种选育及推广研究。E-mail:daogenhe@163.com

plasm resources and determined the indexes to identify the waterlogging-tolerance.

Key words: broccoli; waterlogging tolerance; seedling stage; germplasm resources; principal component analysis; cluster analysis

青花菜(*Brassica oleracea* L. var. *italica* Planch)又名西兰花、绿菜花等,是十字花科芸薹属甘蓝种的一个变种,含有丰富的蛋白质、Vc、胡萝卜素、维生素以及钙、磷、铁等营养元素,被誉为“蔬菜皇冠”。其可食部位花球中富含萝卜硫素,能够有效抑制癌细胞的生长,是蔬菜中抗癌活性最强的天然活性成分^[1-3]。因此,青花菜因具有营养和保健双重功效而深受消费者的青睐。

近年来,由于极端天气时常发生,青花菜的栽培生产面临着巨大挑战。我国南方地区属于亚热带和热带季风气候,青花菜播种育苗及移栽时正值台风多发时期(6—9月),期间带来的强降水会引起涝害,从而导致青花菜不同程度减产。种植耐涝品种是应对强降水对栽培不利影响的重要手段。因此,研究青花菜在涝害下的生理响应及体内有机物含量的变化,对于精确筛选耐涝的青花菜种质资源显得尤为重要。

作物在涝害条件下,生理生化代谢会产生变化,以此来适应不良环境。当前有关涝害对水稻^[4-5]、黄瓜^[6]、棉花^[7-8]、豆类^[9]、玉米^[10-11]等作物影响的研究较多,但在青花菜上的研究较少。涝害会导致青花菜体内的含水量及产量降低;随着淹水时间的延长,次生代谢产物如类黄酮物质含量会显著减少^[12-13]。刘小玲等^[14]利用丙二醛含量、干物质量等为指标,通过隶属函数值的比较,从9个棉花品种中筛选出了2个耐涝品种。郑佳秋等^[15]利用叶绿素、可溶性蛋白质、可溶性糖含量以及各种酶活性等为指标,通过主成分分析及聚类分析,将10个辣椒品种耐涝性分成了3大类,并从中筛选出了1个最耐涝的辣椒

品种。齐琳等^[16]利用叶片色素含量、抗氧化酶活性、活性氧代谢、丙二醛含量、脯氨酸含量、蛋白质含量以及叶绿素快速荧光特性等指标,采用模糊聚类法,将12个无花果品种分成了3大类,并从中筛选出了3个耐涝品种。杨阳等^[17]利用株高、地上部干物质、根干质量、根冠比、POD活性、SOD活性、丙二醛以及脯氨酸含量等指标进行聚类分析,对不同生育期大麻品种的耐盐性进行分类,从中筛选出了1个最耐盐的品种。Hsin等^[18]研究表明,在淹水和高温胁迫下,耐高温型青花菜“TSS-AVRDC-2”的叶绿素含量显著高于高温敏感型“B-75”,气孔导度更低,H₂O₂清除能力更好。综上可知,在研究不同作物的耐涝生理特性时,所参照的生理生化指标因作物类型及生长发育阶段不同而不同,为快速准确筛选特定作物所需的种质资源,需要构建一套标准的具针对性的生理生化指标鉴定体系。因此,本试验采用19份青花菜材料为研究对象,通过测定地上干鲜质量、地下干鲜质量、不定根数、株高、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、丙二醛含量、SOD活性以及POD活性等11个生理生化指标,利用主成分分析及聚类分析,从中筛选与青花菜耐涝性能紧密相关的生理生化指标,据此快速准确筛选抗涝性强的种质资源,以期为青花菜耐涝新品种的选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用青花菜材料19份,其具体名称、来源等信息见表1。

表 1 19 个供试青花菜材料的名称及来源

Table 1 Names and sources of the 19 tested broccoli materials

编号 No.	名称 Name	来源 Source	编号 No.	名称 Name	来源 Source
1	S31	中国 China	11	台绿 2 号 Tailü No. 2	中国 China
2	S40	中国 China	12	台绿 3 号 Tailü No. 3	中国 China
3	S48	中国 China	13	优秀 Youxiu	日本 Japan
4	S53	中国 China	14	耐寒优秀 Naihanyouxiu	日本 Japan
5	S67	中国 China	15	绿雄 90 Lùxiong 90	日本 Japan
6	S73	中国 China	16	炎秀 Yanxiu	日本 Japan
7	S74	中国 China	17	蔓陀绿 Mantuolü	荷兰 Netherlands
8	S78	中国 China	18	绿雄 60 Lùxiong 60	日本 Japan
9	S94	中国 China	19	绿黄帝 Lùhuangdi	日本 Japan
10	台绿 1 号 Tailü No. 1	中国 China			

1.2 试验设计

2015 年在台州市农业科学研究院进行耐涝试验。采用穴盘基质育苗,随机区组排列,试验设 2 个处理,分别为对照和淹水胁迫处理,对照为育苗正常水分管理,每个处理 3 次重复。处理与对照各选取 24 粒饱满的种子进行播种,待幼苗长至三叶一心时将穴盘放入周转箱里进行淹水处理,灌水高于根基 1 cm 处,其他管理与当地的田间管理一致。淹水处理 10 d 后,撤去周转箱,幼苗恢复 3 d,之后随机选取 2 个处理的青花菜幼苗各 10 株,测定株高、不定根数、地上干鲜质量、地下干鲜质量、可溶性糖含量、丙二醛含量以及可溶性蛋白质含量等指标。

1.3 测定指标及方法

地上部和地下部干质量测定时利用剪刀将根部与茎叶部剪开后分别放入烘箱中,105 ℃杀青 15 min,然后于 80 ℃下烘 48 h 至恒质量,之后分别称取地上与地下部干质量;株高采用直尺测量植株根茎部到顶部之间的距离;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[19]测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[20]测定;可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[21]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[19]测定;超氧化物歧化酶(SOD)参照周广生等^[22]的方法测定。

1.4 数据处理与分析

耐涝系数计算公式为:
耐涝系数=处理指标值/对照指标值。
各指标隶属函数值参考周广生等^[22]的方法进

行计算:
$$\mu(x)=(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})。$$
式中: $\mu(x)$ 为某性状耐涝系数的隶属函数值,若指标与耐涝性为负相关,用 $1-\mu(x)$ 表示; x 表示某一性状的耐涝系数; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为某一性状耐涝系数的极大、极小值。

用 Microsoft Excel 2007 整理所有试验数据,用 SPSS 19.0 进行方差分析、主成分分析及聚类分析。

2 结果与分析

2.1 淹水胁迫对青花菜苗期生理生化指标的影响
在淹水胁迫下,不同青花菜材料苗期生理生化指标测定结果见表 2~6,由表 2~6 数据可得表 7 和表 8 数据。由表 7 可知,曼陀绿地上鲜质量的耐涝系数最大,S94 地下鲜质量的耐涝系数最大,绿黄帝地上干质量的耐涝系数最大,S94 地下干质量的耐涝系数最大,曼陀绿株高和不定根数的耐涝系数最大。

由表 8 可知,台绿 2 号可溶性糖含量的耐涝系数最大,S48 可溶性蛋白质含量的耐涝系数最大,炎秀丙二醛含量的耐涝系数最大,S74 超氧化物歧化酶活性的耐涝系数最大,台绿 1 号过氧化物酶活性的耐涝系数最大。

综上可知,19 份材料在单一指标耐涝系数上所表现出的耐涝性均不同,导致筛选结果不稳定,因此需要对 11 个指标的耐涝系数进行综合评价,才能获得准确的筛选结果。

表 2 淹水胁迫对青花菜生物鲜质量的影响

Table 2 Effect of waterlogging on organism fresh weights of broccoli

品种 Cultivar	地上鲜质量/mg Shoot fresh weight		地下鲜质量/mg Underground fresh weight	
	处理 Treatment	对照 Contrast	处理 Treatment	对照 Contrast
1	2.194±0.565 abcde	2.797±0.242 abcde	0.051±0.002 ab	0.104±0.006 ab
2	1.179±0.323 def	1.809±0.641 de	0.050±0.019 ab	0.050±0.029 cd
3	0.890±0.235 f	1.677±0.335 e	0.042±0.021 b	0.078±0.028 abcd
4	1.004±0.116 ef	1.737±0.264 e	0.044±0.012 b	0.085±0.026 abcd
5	1.265±0.094 def	2.051±0.111 cde	0.059±0.006 ab	0.094±0.011 abcd
6	1.594±0.423 def	2.579±1.282 bcde	0.053±0.023 ab	0.084±0.034 abcd
7	1.706±0.252 cdef	2.480±1.155 bcde	0.087±0.014 ab	0.067±0.040 bcd
8	1.875±0.197 cdef	2.958±0.404 abcde	0.050±0.020 ab	0.100±0.016 abc
9	1.982±0.374 bcdef	2.643±0.330 bcde	0.064±0.020 ab	0.045±0.010 d
10	2.357±0.784 abcd	4.097±0.764 a	0.082±0.041 ab	0.111±0.018 ab
11	3.050±0.534 ab	3.203±1.145 abcd	0.096±0.034 ab	0.105±0.036 ab
12	1.640±0.363 def	3.380±0.284 abc	0.055±0.012 ab	0.100±0.010 abc
13	1.957±0.714 bcdef	3.284±0.389 abc	0.058±0.038 ab	0.108±0.023 ab
14	1.551±0.249 def	3.648±1.394 ab	0.055±0.020 ab	0.092±0.046 abcd
15	3.163±1.120 a	3.838±0.987 ab	0.078±0.047 ab	0.106±0.043 ab
16	1.710±0.534 cdef	2.802±0.605 abcde	0.046±0.018 b	0.072±0.017 bcd
17	2.876±1.093 abc	2.957±0.548 abcde	0.121±0.082 a	0.097±0.024 abcd
18	3.071±0.913 ab	3.796±0.381 ab	0.097±0.424 ab	0.130±0.022 a
19	2.329±1.002 abcd	2.648±0.159 bcde	0.097±0.079 ab	0.095±0.019 abcd

表 3 淹水胁迫对青花菜生物干质量的影响

Table 3 Effect of waterlogging on organism dry weights of broccoli

品种 Cultivar	地上干质量/mg Shoot dry weight		地下干质量/mg Underground dry weight	
	处理 Treatment	对照 Contrast	处理 Treatment	对照 Contrast
1	0.203±0.047 abcd	0.293±0.015 abcd	0.012±0.002 b	0.030±0.002 a
2	0.130±0.034 cd	0.151±0.058 d	0.012±0.003 b	0.011±0.007 cd
3	0.106±0.039 d	0.164±0.018 d	0.010±0.004 b	0.019±0.006 abcd
4	0.116±0.007 d	0.162±0.048 d	0.011±0.003 b	0.024±0.009 abc
5	0.145±0.028 cd	0.177±0.041 cd	0.011±0.001 b	0.019±0.004 abcd
6	0.174±0.043 bcd	0.223±0.135 bcd	0.011±0.003 b	0.018±0.011 abcd
7	0.196±0.021 abcd	0.190±0.098 cd	0.015±0.002 b	0.015±0.010 cde
8	0.176±0.006 bcd	0.246±0.038 abcd	0.011±0.003 b	0.023±0.002 abc
9	0.200±0.055 abcd	0.180±0.053 cd	0.013±0.002 b	0.010±0.004 d
10	0.215±0.078 abcd	0.384±0.104 a	0.016±0.008 b	0.028±0.005 a
11	0.304±0.055 ab	0.253±0.100 abcd	0.019±0.005 ab	0.023±0.009 abcd
12	0.136±0.034 cd	0.284±0.028 abcd	0.011±0.003 b	0.021±0.003 abcd
13	0.195±0.079 abcd	0.270±0.047 abcd	0.014±0.006 b	0.022±0.006 abcd
14	0.148±0.030 cd	0.288±0.126 abcd	0.009±0.003 b	0.019±0.008 abcd
15	0.321±0.137 a	0.312±0.090 abc	0.016±0.007 b	0.022±0.009 abcd
16	0.155±0.056 cd	0.223±0.075 bcd	0.010±0.004 b	0.013±0.005 cde
17	0.271±0.091 abc	0.276±0.056 abcd	0.029±0.012 a	0.025±0.008 ab
18	0.323±0.128 a	0.357±0.056 ab	0.018±0.008 b	0.028±0.004 a
19	0.239±0.160 abcd	0.207±0.033 cd	0.019±0.012 ab	0.018±0.005 abcd

注:各编号对应材料与表 1 同,同列数据后标不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下表同。

Note:Lowercase letters indicate significant correlations at the 0.05 probability level. The same below.

表 4 淹水胁迫对青花菜植株及可溶性糖含量的影响

Table 4 Effect of waterlogging on plant and soluble sugar indexes of broccoli

品种 Cultivar	株高/mm Plant height		不定根数 Adventitious root	可溶性糖/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Soluble sugar	
	处理 Treatment	对照 Contrast	处理 Treatment	处理 Treatment	对照 Contrast
1	58.563±13.243 bc	63.157±2.122 bcd	4.000±1.000 g	6.765±1.983 de	3.146±0.221 b
2	39.013±7.067 efg	50.203±4.853 defg	8.333±1.528 cdef	4.669±0.863 defg	2.120±0.930 c
3	47.950±5.670 cde	72.257±10.164 ab	8.333±2.517 cdef	3.723±0.179 efg	0.459±0.143 gh
4	28.010±3.926 h	31.930±2.551 h	8.667±3.512 bcd	12.753±0.069 bc	1.275±0.738 def
5	45.617±7.142 def	48.567±5.431 efg	5.333±0.577 fg	18.900±2.311 a	1.550±0.150 cdef
6	32.957±3.305 gh	37.097±2.095 gh	11.333±1.528 bc	15.115±1.139 b	1.635±0.117 cde
7	49.223±4.975 cde	54.523±8.680 cdef	6.667±1.155 defg	21.700±0.389 a	4.783±0.256 a
8	52.410±3.463 bcd	64.173±5.292 bc	4.000±2.000 g	7.805±2.209 d	1.859±0.313 cd
9	35.730±2.848 fgh	52.623±6.910 cdef	6.667±1.528 defg	12.274±2.627 bc	1.311±0.575 def
10	61.620±6.058 b	78.013±6.808 a	5.667±1.528 efg	5.006±2.468 def	2.135±0.320 c
11	58.953±5.185 bc	63.453±8.567 bcd	7.000±1.000 defg	6.288±2.535 de	0.375±0.156 h
12	49.837±3.187 cde	61.367±1.354 bcde	11.667±1.155 bc	5.945±2.279 de	1.034±0.153 efg
13	63.337±3.886 b	70.897±12.674 ab	12.000±2.000 b	1.663±0.105 g	1.088±0.251 efg
14	45.923±2.794 def	61.513±8.476 bcde	8.667±1.528 bcd	2.232±0.207 fg	1.000±0.173 efg
15	62.803±6.921 b	73.643±14.003 ab	9.333±1.528 bcd	7.131±1.842 d	0.866±0.152 fgh
16	53.727±5.168 bcd	49.820±1.631 defg	9.000±2.000 bcde	3.574±2.034 efg	1.091±0.444 efg
17	92.477±10.483 a	81.613±1.681 a	24.000±3.606 a	7.467±2.029 d	0.997±0.196 efg
18	55.333±4.082 bcd	52.360±4.492 cdef	10.667±1.155 bc	6.370±1.888 de	1.256±0.051 def
19	43.763±4.887 defg	43.610±8.651 fgh	6.000±1.000 defg	10.976±1.418 c	1.404±0.177 def

表 5 淹水胁迫对青花菜可溶性蛋白和丙二醛含量的影响

品种 Cultivar	可溶性蛋白质/(g·kg ⁻¹) Soluble protein		丙二醛/(nmol·mg ⁻¹) MDA	
	处理 Treatment	对照 Contrast	处理 Treatment	对照 Contrast
1	0.072±0.020 def	0.053±0.011 cde	1.216±0.261 ab	0.027±0.008 h
2	0.102±0.012 bcd	0.095±0.013 a	0.879±0.384 bcde	0.555±0.051 c
3	0.281±0.061 a	0.083±0.011 ab	1.631±0.949 a	0.718±0.028 a
4	0.070±0.024 def	0.038±0.012 e	0.590±0.343 cde	0.282±0.020 d
5	0.115±0.020 bc	0.084±0.005 ab	0.682±0.288 bcde	0.163±0.016 e
6	0.121±0.034 b	0.047±0.016 cde	0.741±0.195 bcde	0.158±0.013 e
7	0.121±0.019 b	0.049±0.017 cde	1.148±0.389 abc	0.032±0.008 gh
8	0.076±0.014 cdef	0.059±0.029 bcde	0.961±0.320 bcd	0.645±0.041 b
9	0.091±0.016 bcde	0.048±0.011 cde	0.788±0.046 bcde	0.028±0.008 h
10	0.056±0.006 ef	0.043±0.011 de	0.674±0.065 bcde	0.063±0.008 g
11	0.062±0.009 def	0.051±0.019 cde	0.534±0.183 de	0.161±0.010 e
12	0.081±0.010 cdef	0.073±0.020 abc	0.602±0.236 cde	0.004±0.003 h
13	0.074±0.017 def	0.069±0.005 abcd	0.274±0.152 e	0.003±0.002 h
14	0.071±0.007 def	0.066±0.012 bcd	0.754±0.102 bcde	0.148±0.008 ef
15	0.081±0.009 cdef	0.037±0.006 e	0.807±0.062 bcde	0.152±0.008 ef
16	0.062±0.019 def	0.047±0.011 cde	0.284±0.023 e	0.003±0.002 h
17	0.070±0.006 def	0.058±0.017 bcde	0.920±0.183 bcd	0.122±0.010 f
18	0.049±0.008 f	0.051±0.017 cde	0.635±0.170 bcde	0.021±0.010 h
19	0.077±0.016 cdef	0.038±0.003 e	0.683±0.103 bcde	0.020±0.008 h

注:对照不定根数为 0。
Note: Adventitious root number was 0 in contrast.

表 6 淹水胁迫对青花菜抗氧化酶活性的影响

品种 Cultivar	SOD/(U·kg ⁻¹)		POD/(U·kg ⁻¹)	
	处理 Treatment	对照 Contrast	处理 Treatment	对照 Contrast
1	169.803±5.567 fgh	142.339±11.247 g	145.264±37.665 de	271.574±19.916 bcdefg
2	221.163±33.260 cdefg	246.975±14.772 abc	290.096±74.185 abcd	353.440±50.354 ab
3	384.339±83.665 a	227.694±25.432 bcd	254.033±50.882 abcde	289.256±35.768 bcdef
4	203.400±41.514 defg	159.667±39.502 efg	177.193±12.791 cde	150.597±46.612 ij
5	339.033±50.488 ab	292.340±51.730 a	253.376±65.327 abcde	305.659±41.800 bcde
6	288.904±74.874 bcd	193.222±11.452 cdefg	263.655±89.059 abcde	316.514±29.001 abcd
7	339.606±99.948 ab	199.459±53.533 cdef	394.594±18.272 a	289.157±35.018 bcdef
8	253.775±71.442 bcdefg	178.436±10.360 defg	228.658±27.425 abcde	209.440±36.761 fghij
9	233.049±43.392 cdefg	181.988±23.085 defg	338.267±78.741 abc	403.670±126.051 a
10	293.002±68.993 abcd	176.141±25.078 defg	300.914±224.023 abcd	126.183±11.988 j
11	190.156±0.108 efgh	141.671±18.934 g	117.454±27.762 e	173.293±25.174 hij
12	110.329±24.516 h	76.503±24.939 h	275.983±116.790 abcde	254.268±43.754 cdefgh
13	164.191±4.448 gh	152.745±20.123 fg	246.611±98.752 abcde	223.983±25.062 efghi
14	268.348±17.500 bcde	204.416±43.544 cdef	266.517±75.667 abcde	324.059±25.053 abcd
15	231.866±58.598 cdefg	170.849±20.054 efg	212.385±65.724 bcde	196.721±54.992 ghij
16	283.891±34.550 bcde	215.737±29.705 cde	379.996±47.837 ab	240.462±25.672 defghi
17	314.636±34.254 abc	269.632±26.673 ab	228.288±8.685 abcde	338.549±53.790 abc
18	261.672±0.219 bcdef	237.813±33.429 bc	274.457±118.643 abcde	337.107±40.313 abc
19	241.106±36.378 cdefg	165.605±15.037 efg	345.919±102.106 abc	192.944±60.891 ghij

表 7 青花菜生长指标的耐涝系数

Table 7 Waterlogging tolerant coefficient of growth indexes of broccoli

品种 Cultivar	地上鲜质量 Shoot fresh weight	地下鲜质量 Underground fresh weight	地上干质量 Shoot dry weight	地下干质量 Underground dry weight	株高 Plant height	不定根数 Adventitious root
1	0.79±0.20 abcde	0.49±0.02 d	0.69±0.16 abc	0.42±0.07 f	0.93±0.21 bcde	4.00±1.00 g
2	0.65±0.18 abcde	0.10±0.38 abcd	0.86±0.23 abc	1.09±0.26 abc	0.78±0.14 ef	8.33±1.53 cdef
3	0.53±0.14 cde	0.54±0.26 cd	0.65±0.23 abc	0.53±0.22 def	0.66±0.08 f	8.33±2.52 cdef
4	0.58±0.07 bede	0.52±0.14 cd	0.72±0.04 abc	0.48±0.11 ef	0.88±0.12 cde	8.67±3.51 bedef
5	0.62±0.05 abcde	0.63±0.07 bed	0.82±0.16 abc	0.62±0.03 bcdef	0.94±0.15 bcde	5.33±0.58 fg
6	0.62±0.16 abcde	0.64±0.27 bed	0.78±0.20 abc	0.63±0.15 bcdef	0.89±0.09 bcde	11.33±1.53 bc
7	0.69±0.10 abcde	1.31±0.21 ab	1.03±0.11 abc	1.01±0.14 abcde	0.90±0.09 bcde	6.67±1.15 defg
8	0.63±0.07 abcde	0.50±0.20 cd	0.72±0.03 abc	0.46±0.12 f	0.82±0.05 def	4.00±2.00 g
9	0.75±0.14 abcde	1.41±0.43 a	1.11±0.30 ab	1.41±0.25 a	0.68±0.05 f	6.67±1.53 defg
10	0.58±0.19 bcde	0.74±0.37 abcd	0.56±0.20 bc	0.58±0.29 cdef	0.79±0.08 ef	5.67±1.53 defg
11	0.95±0.17 ab	0.92±0.32 abcd	1.20±0.22 a	0.85±0.21 bcdef	0.93±0.08 bcde	7.00±1.00 defg
12	0.49±0.11 de	0.55±0.12 cd	0.48±0.12 c	0.54±0.12 def	0.81±0.05 def	11.67±1.15 bc
13	0.60±0.22 abcde	0.53±0.35 cd	0.72±0.29 abc	0.63±0.29 bcdef	0.89±0.06 bcde	12.00±2.00 b
14	0.43±0.07 e	0.60±0.22 bed	0.52±0.10 c	0.49±0.13 ef	0.75±0.05 ef	8.67±1.53 bcdef
15	0.82±0.29 abcd	0.73±0.44 abcd	1.03±0.44 abc	0.73±0.30 bcdef	0.85±0.09 def	9.33±1.53 bed
16	0.61±0.19 abcde	0.65±0.24 bed	0.70±0.25 abc	0.79±0.25 bcdef	1.08±0.10 ab	9.00±2.00 bcde
17	0.97±0.37 a	1.25±0.85 abc	0.98±0.33 abc	1.14±0.49 ab	1.13±0.13 a	24.00±3.61 a
18	0.81±0.24 abcde	0.75±0.33 abcd	0.91±0.36 abc	0.65±0.30 bcdef	1.06±0.08 abc	10.67±1.15 bc
19	0.88±0.38 abc	1.01±0.83 abcd	1.16±0.77 a	1.07±0.66 abcd	1.00±0.11 abcd	6.00±1.00 defg

表 8 青花菜生理生化指标的耐涝系数

Table 8 Waterlogging tolerance coefficient of physiology and biochemistry indexes of broccoli

品种 Cultivar	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白质 Soluble protein	丙二醛 MDA	SOD	POD
1	2.15±0.63 gh	1.37±0.78 defg	45.63±9.81 c	1.19±0.04 abcde	0.53±0.14 d
2	2.20±0.41 gh	1.07±0.13 g	1.58±0.69 f	0.90±0.13 e	0.82±0.21 cd
3	8.12±0.39 cde	3.36±0.74 a	1.81±0.52 f	1.69±0.37 ab	0.88±0.18 bcd
4	10.00±0.05 bc	1.86±0.64 cdef	1.62±0.53 f	1.27±0.26 abcde	1.18±0.08 bcd
5	12.20±1.49 b	1.37±0.24 defg	3.16±0.22 f	1.16±0.17 cde	0.83±0.21 cd
6	9.25±0.70 bcd	2.59±0.74 b	4.71±1.24 f	1.50±0.39 abcd	0.83±0.28 cd
7	4.54±0.08 efgh	2.46±0.38 bc	35.70±12.03 cd	1.70±0.50 a	1.36±0.06 bcd
8	4.20±1.19 fgh	1.29±0.24 efg	1.23±0.11 f	1.42±0.40 abcd	1.09±0.13 bcd
9	9.36±2.00 bcd	1.92±0.33 bcde	28.40±1.67 de	1.28±0.24 abcde	0.84±0.20 cd
10	2.34±1.16 gh	1.29±0.13 efg	10.75±1.03 f	1.66±0.39 abc	2.38±1.78 a
11	16.75±6.75 a	1.20±0.18 fg	3.32±1.14 f	1.34±0.01 abcde	0.68±0.16 cd
12	5.75±2.20 defg	1.11±0.14 g	66.88±2.62 b	1.44±0.32 abcd	1.09±0.46 bcd
13	1.53±0.10 h	1.06±0.25 g	56.61±20.86 b	1.07±0.03 de	1.10±0.44 bcd
14	2.23±0.21 gh	1.08±0.10 g	5.11±0.69 f	1.31±0.09 abcde	0.82±0.23 cd
15	8.23±2.13 cde	2.15±0.22 bc	5.29±0.41 f	1.36±0.34 abcde	1.08±0.33 bcd
16	3.28±1.86 gh	1.31±0.40 efg	77.41±6.31 a	1.32±0.16 abcde	1.58±0.20 abc
17	7.49±2.03 cdef	1.21±0.10 fg	7.56±1.51 f	1.17±0.13 bcde	0.67±0.03 cd
18	5.07±1.50 efg	0.95±0.15 g	21.70±1.85 e	1.10±0.01 de	0.81±0.35 cd
19	7.82±1.01 cdef	2.04±0.42 bcd	29.69±4.44 de	1.46±0.22 abcd	1.79±0.53 ab

2.2 淹水胁迫下青花菜苗期各指标间的相关性

由表 9 可知,淹水胁迫下,青花菜地上鲜质量与地下鲜质量、地上干质量、地下干质量之间的相关性达到极显著水平,相关系数分别为 0.702,0.893,0.672,与株高相关性达到显著水平,相关系数为 0.443;地下鲜质量与地上干质量、地下干质量相关性都达到极显著水平,相关系数分别为 0.786,0.927;地上干质量与地下干质量的相关性达到极显

著水平,相关系数为0.799,与株高、可溶性糖含量达到显著水平,相关系数分别为 0.264,0.280,说明地上部分生长与地下部分生长紧密相关;不定根与株高的相关性达到显著水平,相关系数为 0.346。可溶性蛋白质含量与 SOD 活性的相关性达到极显著水平,相关系数为 0.412。SOD 活性与 POD 活性相关性达到显著水平,相关系数为 0.335。

表 9 淹水胁迫下青花菜苗期生理生化指标间的相关性

Table 9 Correlation coefficients of physiology and biochemistry indexes of broccoli seedling under waterlogging stress											
指标 Index	地上鲜 质量 Shoot fresh weight	地下 鲜质量 Underground fresh weight	地上干 质量 Shoot dry weight	地下干质量 Under- ground dry weight	不定 根数 Adventitious root	株高 Plant height	丙二醛 MDA	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性 蛋白质 Soluble protein	SOD	POD
地上鲜质量 Shoot fresh weight	1										
地下鲜质量 Underground fresh weight	0.702**	1									
地上干质量 Shoot dry weight	0.893**	0.786**	1								
地下干质量 Underground dry weight	0.672**	0.927**	0.799**	1							
不定根数 Adventitious root	0.207	0.197	0.048	0.204	1						
株高 Plant height	0.443*	0.083	0.264*	0.090	0.346*	1					
丙二醛 MDA	-0.066	-0.115	-0.032	-0.129	-0.111	-0.207	1				
可溶性糖 Soluble sugar	0.187	0.053	0.280*	0.104	0.013	0.067	0.116	1			
可溶性蛋白质 Soluble protein	-0.053	0.064	0.095	0.038	-0.060	-0.256	0.120	0.233	1		
SOD	-0.018	0.067	0.035	0.002	-0.169	-0.130	0.034	0.740	0.412**	1	
POD	-0.022	0.095	-0.009	0.070	-0.137	-0.073	-0.152	-0.228	0.092	0.335*	1

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平上相关性显著。

Note: * and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.3 青花菜苗期耐涝性的主成分分析

由表 10 可知,青花菜苗期耐涝性前 6 个主成分的贡献率分别为 32.58%, 16.89%, 12.93%, 9.81%, 7.94%, 7.22%, 累计贡献率达 87.35%, 考虑到累计贡献率大于 85% 的原则,说明这 6 个主成分足以反映该数据的信息,符合主成分分析的要求。

表 10 青花菜苗期耐涝性 6 个主成分的特征根及贡献率

Table 10 Eigen values of 6 principal components and their contributions of waterlogging tolerance of broccoli at seedling stage			
主成分 Principal component	特征值 Eigen value	贡献率/% Contribution	累计贡献率/% Cumulative contribution
I	3.58	32.58	32.58
II	1.86	16.89	49.46
III	1.42	12.93	62.39
IV	1.08	9.81	72.20
V	0.87	7.94	80.14
VI	0.79	7.22	87.35

由表 10 和表 11 可知,第 I 主成分对应的地下鲜质量(X_2)绝对值最大即贡献率最大,可反映全部数据 32.58% 的信息,因此第 I 主成分主要由地下鲜质量(X_2)决定。第 II 主成分对应的 SOD 活性(X_{10})绝对值最大即贡献率最大,其可反映全部数据 16.89% 的信息,因此第 II 主成分主要由 SOD 活性(X_{10})决定。第 III 主成分对应的可溶性糖含量(X_8)绝对值最大即贡献率最大,其可反映全部数据 12.93% 的信息,因此第 III 主成分主要由可溶性糖含量(X_8)决定。第 IV 主成分对应的株高(X_6)绝对值最大即贡献率最大,其可反映全部数据 9.81% 的信息,因此第 IV 主成分主要由株高(X_6)决定。第 V 主成分对应的不定根数(X_5)绝对值最大即贡献率最大,其可反映全部数据 7.94% 的信息,因此第 V 主成分主要由不定根数(X_5)决定。同样第 VI 主成分对应的丙二醛含量(X_7)绝对值最大即贡献率最大,其可反映全部数据 7.22% 的信息,因此第 VI 主成分主要由丙二醛含量(X_7)决定。

根据主成分分析得出因子得分函数公式:

$$Y_1=0.217X_1+0.313X_2+0.270X_3+0.312X_4-0.040X_5-0.086X_6+0.029X_7-0.033X_8-0.012X_9-0.041X_{10}+0.022X_{11}。$$

$$Y_2 = 0.015X_1 - 0.021X_2 - 0.003X_3 - 0.065X_4 + 0.049X_5 + 0.023X_6 + 1.002X_7 - 0.128X_8 - 0.065X_5 + 0.113X_6 + 0.026X_7 + 0.059X_8 + 0.395X_9 + 0.587X_{10} + 0.408X_{11}。$$

$$Y_3 = 0.022X_1 - 0.120X_2 + 0.102X_3 - 0.075X_4 - 0.070X_5 + 0.044X_6 - 0.130X_7 + 0.706X_8 + 0.286X_9 - 0.004X_{10} - 0.431X_{11}。$$

$$Y_4 = 0.287X_1 - 0.213X_2 + 0.092X_3 - 0.234X_4 - 0.003X_5 + 0.759X_6 + 0.074X_7 + 0.089X_8 - 0.229X_9 + 0.164X_{10} + 0.182X_{11}。$$

$$Y_5 = -0.091X_1 + 0.087X_2 - 0.186X_3 + 0.072X_4 + 0.919X_5 + 0.065X_6 + 0.038X_7 - 0.136X_8 + 0.295X_9 - 0.009X_{10} - 0.132X_{11}。$$

$$Y_6 = 0.119X_1 - 0.021X_2 + 0.054X_3 - 0.063X_4 +$$

$0.049X_5 + 0.023X_6 + 1.002X_7 - 0.128X_8 - 0.038X_9 + 0.065X_{10} - 0.049X_{11}。$

$Y_1、Y_2、Y_3、Y_4、Y_5$ 和 Y_6 分别只反映部分数据,说明以单一的主成分不能进行主成分分析,必须由 $Y_1、Y_2、Y_3、Y_4、Y_5$ 和 Y_6 得到综合因子的得分函数才能进行综合评价,其函数为 $Y = 0.3258Y_1 + 0.1689Y_2 + 0.1293Y_3 + 0.0981Y_4 + 0.0794Y_5 + 0.0722Y_6$ 。利用综合因子得分(Y)能够对不同青花菜材料的耐涝能力作出综合性评价, Y 值越大,代表该材料的耐涝能力越强。由表 12 可知,炎秀的 Y 值最大,说明其是 19 个材料中最耐涝的,而 S78 的 Y 值最小,最不耐涝。

表 11 青花菜苗期各指标主成分的特征向量及贡献率

Table 11 Feature vector and contribution rate of each principal component at seedling stage

性状 Trait	主成分Ⅰ(Y_1) PCⅠ	主成分Ⅱ(Y_2) PCⅡ	主成分Ⅲ(Y_3) PCⅢ	主成分Ⅳ(Y_4) PCⅣ	主成分Ⅴ(Y_5) PCⅤ	主成分Ⅵ(Y_6) PCⅥ
地上鲜质量(X_1) Shoot fresh weight	0.217	0.015	0.022	0.287	-0.091	0.119
地下鲜质量(X_2) Underground fresh weight	0.313*	-0.021	-0.120	-0.213	0.087	-0.021
地上干质量(X_3) Shoot dry weight	0.270	-0.003	0.102	0.092	-0.186	0.054
地下干质量(X_4) Underground dry weight	0.312	-0.065	-0.075	-0.234	0.072	-0.063
不定根数(X_5)Adventitious root	-0.040	0.065	-0.070	-0.003	0.919*	0.049
株高(X_6)Plant height	-0.086	0.113	0.044	0.759*	0.065	0.023
丙二醛(X_7)MDA	0.029	0.026	-0.130	0.074	0.038	1.002*
可溶性糖(X_8)Soluble sugar	-0.033	0.059	0.706*	0.089	-0.136	-0.128
可溶性蛋白质(X_9) Soluble protein	-0.012	0.395	0.286	-0.299	0.295	-0.038
SOD(X_{10})	-0.041	0.587*	-0.004	0.164	-0.009	0.065
POD(X_{11})	0.022	0.408	-0.431	0.182	-0.132	-0.049

注: * 表示某指标在各主成分中的最大绝对值。
Note: * indicates maximum absolute value in each principal component.

表 12 不同青花菜材料耐涝性的综合评价

Table 12 Comprehensive assessment of waterlogging tolerance of different broccoli materials

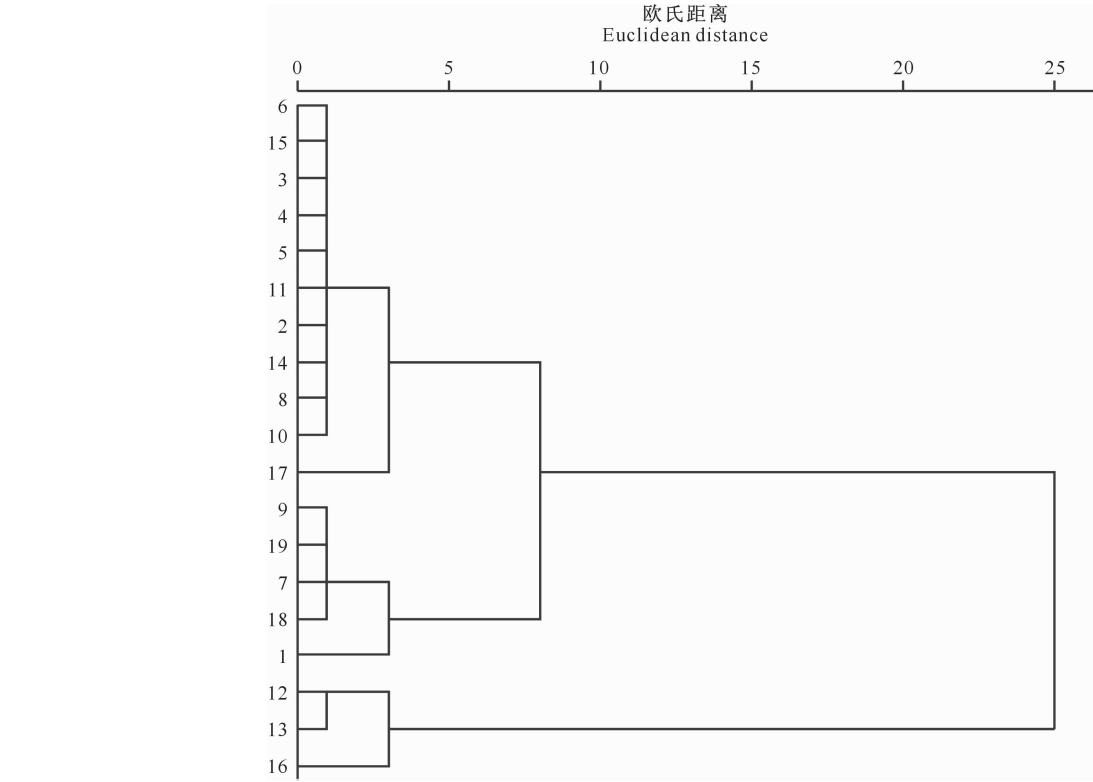
品种 Variety	综合因子得分(Y) Comprehensive evaluation	排序 Order	品种 Variety	综合因子得分(Y) Comprehensive evaluation	排序 Order
炎秀 Yanxiu	8.594	1	S73	2.714	11
台绿 3 号 Tailü No. 3	7.951	2	绿雄 90 Lùxiong 90	2.541	12
优秀 Youxiu	6.706	3	S67	2.213	13
S31	5.158	4	台绿 1 号 Tailü No. 1	2.195	14
S74	4.924	5	S53	2.183	15
S94	4.573	6	S48	2.158	16
绿黄帝 Lùhuangdi	4.560	7	耐寒优秀 Naihanyouxiu	1.778	17
蔓陀绿 Mantuolü	3.818	8	S40	1.505	18
绿雄 60 Lùxiong 60	3.758	9	S78	1.288	19
台绿 2 号 Tailü No. 2	2.827	10			

2.4 不同青花菜材料苗期耐涝性的聚类分析

根据表 12 得出的 Y 值进行聚类分析,利用系统分类的组内联接法,当欧式距离为 5 时,可将 19 个青花菜材料分为 3 大类(图 1)。由图 1 可见,第Ⅰ

类群包括炎秀、台绿 3 号、优秀,这 3 个材料的 Y 值大于其他材料,具有强耐涝能力。第Ⅱ类群包括 S31、S74、S94、绿黄帝、绿雄 60,这些材料的 Y 值都较大,较耐涝。第Ⅲ类群包括蔓陀绿、台绿 2 号、

S73、绿雄 90、S67、台绿 1 号、S53、S48、耐寒优秀、 S40、S78,这些材料的 Y 值都较小,相对不耐涝。



各编号对应材料与表 1 同

The numbers are same as Table 1

图 1 19 个供试青花菜材料基于耐涝性的聚类结果

Fig. 1 Dendrogram of 19 broccoli materials based on waterlogging tolerance

3 讨 论

植物的耐涝性是一个复杂的综合性状,而且在整个生育期中的耐涝性表现不同,但苗期是耐涝性鉴定的关键时期,可以准确反映成株期的耐涝性,因此建立青花菜耐涝性早期鉴定方法,可以快速筛选耐涝的种质资源,缩短育种年限。由于植物在苗期时极易受逆境的影响,因此在苗期筛选耐涝材料对选育抗逆品种具有重要意义。目前鉴定植物苗期耐涝性所用的指标较多,未形成统一的快速筛选评价体系;而且不同植物在涝害条件下生理生化指标所产生的变化不同,导致其相适应的鉴定评价体系也有别。通过对 19 份青花菜材料的耐涝系数进行主成分分析,从地下干鲜质量、地上干鲜质量、株高、不定根数、可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、丙二醛含量、SOD 活性及 POD 活性等 11 个单项指标中,选出影响较大的地下鲜质量、SOD 活性、可溶性糖含量、株高、不定根数以及丙二醛含量等 6 个独立指标,综合评价青花菜材料的耐涝性。筛选结果与范川等^[23]的研究结果不同,可能是因为不同植物对涝

害生理生化响应不同所导致。

涝害胁迫下植物苗期的形态指标与内部结构发生改变,其体内的次生代谢产物、内源激素含量以及渗透调节物也会产生变化。如大豆在涝害胁迫下,根系产生大量的不定根^[24],其体内的丙二醛与脯氨酸含量增加^[9,25]。高洪波等^[26]研究表明,淹水胁迫下黄瓜的可溶性蛋白质含量下降,而可溶性糖与丙二醛含量显著增加。这与郑佳秋等^[27]的研究结果有不同之处,这是因为不同植物对涝害的生理响应不同。虽然植物能够通过各生理生化指标的调整来适应涝害环境,但其生长仍受到抑制,干物质积累受阻,导致地下干鲜质量及地上干鲜质量增幅下降。POD 与 SOD 是植物的保护酶,可有效清除活性氧、自由基,保持体内活性氧的平衡,从而增强抵御逆境的能力。虽然许多研究已经筛选出与耐涝性有关的单项指标,但植物的耐涝性是由多基因控制的数量遗传性状,受到基因与环境的共同影响。因此凭任一单项指标都不能准确反映植物的耐涝性,而需要通过多指标隶属函数法综合评价才能更全面地反映植物的耐涝性。本试验通过测定不同青花菜材料的

地下干质量、地下鲜质量、丙二醛含量、可溶性糖含量、SOD 活性和 POD 活性等 11 个生理生化指标,利用主成分及聚类分析对 19 份青花菜材料的耐涝性进行了归类,结果显示,炎秀在幼苗期最耐涝,而 S78 最不耐涝。但此试验仅研究了青花菜幼苗期的耐涝性,若想了解青花菜整个生育期的综合耐涝性,还需从不同生育期的生理生化指标变化以及分子水平上进行更深入的研究。

4 结 论

通过对青花菜苗期耐涝性进行综合评价,将 19 份青花菜材料按耐涝性分为 3 大类,其中耐涝的青花菜种质资源为炎秀、台绿 3 号、优秀;较耐涝的为 S31、S74、S94、绿黄帝、S94、绿雄 60;相对不耐涝的为蔓陀绿、台绿 2 号、S73、绿雄 90、S67、台绿 1 号、S53、S48、耐寒优秀、S40、S78。通过对 19 份青花菜材料的耐涝系数进行主成分分析,选出地下鲜质量、SOD 活性、可溶性糖含量、株高、不定根数及丙二醛含量等 6 个独立指标,这些指标可用于快速筛选苗期耐涝青花菜材料。

[参考文献]

[1] 姚雪琴,谢祝捷,李光庆,等. 青花菜不同器官中 4-甲基亚磺酰丁基硫苷及萝卜硫素含量分析 [J]. 中国农业科学,2011,44(4):851-858.
Yao X Q,Xie Z J,Li G Q,et al. Analysis of glucoraphanin and sulforaphane contents in different organs of broccoli [J]. Scientia Agricultura Sinica,2011,44(4):851-858.

[2] 林俊城,吴秋云,高灿红,等. 青花菜硫、硒代谢竞争及其对保健功能的影响研究进展 [J]. 中国细胞生物学学报,2011,33(4):422-432.
Lin J C,Wu Q Y,Gao C H,et al. The competition of sulfur and selenium and their effect on health care function in broccoli: a review [J]. Chinese Journal of Cell Biology,2011,33(4):422-432.

[3] Mohamed A F,Amira A M. Sulforaphane composition, cytotoxic and antioxidant activity of crucifer vegetables [J]. Journal of Advanced Research,2010,1:65-70.

[4] 姬静华,霍治国,唐力生,等. 早稻灌浆期淹水对剑叶理化特性及产量和品质的影响 [J]. 中国水稻科学,2016,30(2):181-192.
Ji J H,Huo Z G,Tang L S,et al. Grain yield and quality and physiological and biochemical characteristics of flag leaf in early rice as affected by submergence at filling stage [J]. Chinese Journal Rice Science,2016,30(2):181-192.

[5] 王振省,李 磊,李婷婷,等. 水稻分蘖期淹水对根系生长和产量的影响研究 [J]. 灌溉排水学报,2014,33(6):54-57.
Wang Z S,Li L,Li T T,et al. Effect of waterflooding on root

growth and yield of rice at tillering stage [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2014,33(6):54-57.

[6] Zhu J,Yu B,Zhou G L. Effect of waterlogging stress on growth and physiological index in cucumber seedlings [J]. Agricultural Science & Technology,2016,17(8):1849-1851,1891.

[7] 胡根海,董 娜,张志勇,等. 不同陆地棉品种对苗期淹水的生理响应 [J]. 灌溉排水学报,2016,35(9):70-74.
Hu G H,Dong N,Zhang Z Y,et al. Physiological effects of waterlogging on different upland cotton varieties at the seedling stage [J]. Journal of Irrigation and Draunage,2016,35(9):70-74.

[8] 徐道青,郑曙峰,王 维,等. 不同淹水程度对棉花苗期生长及生理变化的影响 [J]. 农学学报,2016,6(2):33-38.
Xu D Q,Zheng S F,Wang W,et al. Effect of waterlogging degree on cotton seedling growth and physiological change [J]. Journal of Agriculture,2016,6(2):33-38.

[9] 宋晓慧,滕占林,箫长亮,等. 淹水胁迫对不同耐涝性大豆品种苗期根部形态及叶部生理指标的影响 [J]. 大豆科学,2013,32(1):130-132.
Song X H,Teng Z L,Xiao C L,et al. Effect of waterlogging on root morphology and foliar physiological indexes of soybean varieties [J]. Soybean Science,2013,32(1):130-132.

[10] 僧珊珊,王 群,李潮海,等. 淹水胁迫下不同玉米品种根结构及呼吸代谢差异 [J]. 中国农业科学,2012,45(20):4141-4148.
Seng S S,Wang Q,Li C H,et al. Difference in root structure and respiration metabolism between two maize cultivars under waterlogging stress [J]. Scientia Agricultura Sinica,2012,45(20):4141-4148.

[11] 周自强,王福友,陈建飞,等. 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米糖、氮代谢底物量的影响 [J]. 中国生态农业学报,2013,21(6):715-719.
Zhou Z Q,Wang F Y,Chen J F,et al. Effect of water-logging and nitrogen form on substrates of sugar and nitrogen metabolism in maize (*Zea mays* L.) at seedling stage [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2013,21(6):715-719.

[12] Khan M A M,Christian U,Inga M. Effect of water stress and aphid herbivory on flavonoids in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) [J]. Journal of Applied Botany and Food Quality,2011,84:178-182.

[13] Khan M A M,Christian U. Water stress alters aphid-induced glucosinolate response in *Brassica oleracea* var. *italica* differently [J]. Chemoecology,2011,21:235-242.

[14] 刘小玲,徐道青,郑曙峰,等. 棉花的蕾期耐涝性鉴定及对淹水胁迫的响应 [J]. 农学学报,2016,6(9):15-20.
Liu X L,Xu D Q,Zheng S F,et al. Waterlogging stress during cotton bud stage: tolerance identification and responses [J]. Journal of Agriculture,2016,6(9):15-20.

[15] 郑佳秋,顾闽峰,祖艳侠,等. 辣椒品种苗期耐涝性评价 [J]. 江苏农业学报,2012,28(2):457-458.
Zheng J Q,Gu M F,Zu Y X,et al. Evaluation of waterlogging tolerance of pepper variety [J]. Jiangsu Journal of Agriculture

- Sciences,2012,28(2):457-458.
- [16] 齐琳,马娜,吴雯雯,等.无花果品种幼苗淹水胁迫的生理响应与耐涝性评估[J].园艺学报,2015,42(7):1273-1284.
Qi L, Ma N, Wu W W, et al. Physiological responses and tolerance evaluation of fig cultivars to waterlogging [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2015, 42(7):1273-1284.
- [17] 杨阳,苏文君,杜光辉,等.大麻萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J].云南农业大学学报(自然科学版),2016,31(3):392-397.
Yang Y, Su W J, Du G H, et al. Evaluation for salt tolerance of hemp at germinating and seedling stages and selection of salt tolerance indices [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2016, 31(3):392-397.
- [18] Hsin H L, Kuan H L, Su C C, et al. Proteomic analysis of broccoli (*Brassica oleracea*) under high temperature and waterlogging stresses [J]. Botanical Studies, 2015, 56:18.
- [19] 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,2000.
Li H S. The principle and technology of plant physiology and biochemistry experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [20] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2003.
Zhang Z L, Qu W J. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [21] 高俊凤.植物生理学实验技术[M].西安:世界图书出版公司,2000.
Gao J F. Experimental technique of plant physiology [M]. Xi'an: World Book Press, 2000.
- [22] 周广生,梅方竹,周竹青,等.小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J].中国农业科学,2003,36(11):1378-1382.
Zhou G S, Mei F Z, Zhou Z Q, et al. Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(11):1378-1382.
- [23] 范川,李贤伟,张健康,等.毛豹皮樟4个品种幼苗对水涝胁迫的生理响应[J].西北林学院学报,2009,24(6):10-14.
Fan C, Li X W, Zhang J K, et al. Physiological response of flooding stress on the seedlings of four varieties of *Lisea coreana* var. *lanuginosa* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(6):10-14.
- [24] Yoon H K, Sun J H, Muhammad W, et al. Comparative analysis of endogenous hormones level in two soybean (*Glycin max* L.) lines differing in waterlogging tolerance [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6:714.
- [25] 宋晓慧,张智杰,李春光,等.淹水时间对不同耐涝性大豆品种苗期根部形态和叶部生理指标的影响[J].大豆科学,2014,33(1):70-72.
Song X H, Zhang Z J, Li C G, et al. Effect of waterlogging time on root morphology and foliar physiological indexes of soybean varieties [J]. Soybean Science, 2014, 33(1):70-72.
- [26] 高洪波,章铁军,吴晓蕾,等.淹水胁迫下 γ -氨基丁酸对黄瓜幼苗生长和生理代谢的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2007,28(3):158-162.
Gao H B, Zhang T J, Wu X L, et al. Effect of exogenous γ -aminobutyric acid on growth and physiological metabolism in cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under flooding stress [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2007, 28(3):158-162.
- [27] 郑佳秋,郭军,梅赓,等.辣椒幼苗形态及生理特性对涝害胁迫的响应[J].西南农业学报,2016,29(3):536-540.
Zheng J Q, Guo J, Mei Y, et al. Response of morphology and physiological characteristics of hot pepper seedling to waterlogging stress [J]. Southwest China Journal of Agricultural Science, 2016, 29(3):536-540.