

不同菊花品种根系、地上部和叶片 相关指标分析及抗逆性评价

吴盼婷^{1,①}, 王江民^{2,①}, 沈佳逾¹, 杨友翠¹, 管志勇¹, 房伟民¹, 陈发棣^{1,②}

(1. 南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095; 2. 云南省农业科学院质量标准与检测技术研究所, 云南 昆明 650205)

摘要: 采用盆栽法对 6 个菊花 (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) 品种幼苗的根系和地上部相关指标及叶片光合和气体交换参数进行了比较和相关性分析; 并基于叶片相对含水量、相对电导率、丙二醛含量和可溶性糖含量 4 个生理生化指标, 采用隶属函数法对不同菊花品种幼苗的抗旱性和耐热性进行了评价。结果表明: 不同菊花品种间幼苗的根系和地上部相关指标及叶片光合和气体交换参数存在一定差异。相关性分析结果表明: 根系的大多数相关指标与株高呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 但与茎粗和单株叶数却没有显著相关性; 并且, 单株的根体积、根鲜质量和干质量与单株地上部鲜质量呈极显著正相关 (相关系数分别为 0.598、0.642 和 0.599), 与单株地上部干质量呈极显著或显著正相关 (相关系数分别为 0.736、0.606 和 0.553)。主根长与净光合速率和蒸腾速率, 平均根长与水分利用效率及单株根鲜质量与蒸腾速率呈显著正相关 (相关系数分别为 0.475、0.517、0.570 和 0.477); 单株根干质量与蒸腾速率及根系活力与净光合速率和水分利用效率呈极显著正相关 (相关系数分别为 0.641、0.877 和 0.814)。抗逆性评价结果表明: 品种‘南农红霞’ (‘Nannong Hongxia’)、‘大白托桂’ (‘Qx073’) 和‘天使’ (‘Angelina’) 的平均隶属函数值分别为 0.93、0.93 和 0.72, 据此判断这 3 个菊花品种的抗旱性最强; 品种‘馒头菊’ (‘Cayman’) 和‘南农红霞’ 的平均隶属函数值分别为 0.82 和 0.70, 据此判断这 2 个菊花品种的耐热性最强。综上所述, 不同菊花品种幼苗的根系相关指标差异明显, 并且根系生长状况能够影响地上部的生长和发育, 品种‘南农红霞’ 的抗旱性和耐热性均很强, 具有较高的抗性育种价值。

关键词: 菊花; 根系; 抗旱性; 耐热性; 相关性分析; 隶属函数法

中图分类号: Q945; Q948.112; S682.1⁺1.034 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)02-0046-09
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.02.06

Analyses on related indexes of root, above-ground part and leaf of different cultivars of *Chrysanthemum morifolium* and stress resistance evaluation WU Panting^{1,①}, WANG Jiangmin^{2,①}, SHEN Jiayu¹, YANG Youcui¹, GUAN Zhiyong¹, FANG Weimin¹, CHEN Fadi^{1,②} (1. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Quality Standards and Testing Technology, Yunnan Provincial Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(2): 46-54

Abstract: Related indexes of root and above-ground part, and leaf photosynthetic and gas exchange parameters of six cultivar seedlings of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. were compared by pot-culture method and their correlation analyses were carried out, and drought resistance and heat tolerance of different cultivar seedlings of *C. morifolium* were evaluated by subordinate function method according to four physiological and biochemical indexes of leaf including relative water content, relative electrical

收稿日期: 2017-10-31

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 [CX(14)2022; CX(14)2023]; 江苏省农业三新工程项目 [SXGC(2015)322; SXGC(2016)318]; 国家农业部公益性行业 (农业) 科研专项 (201403039); 中央高校基本业务费项目 (KYCYL201501)

作者简介: 吴盼婷 (1989—), 女, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要从事菊花抗逆性研究。

王江民 (1964—), 男, 云南思茅人, 本科, 研究员, 主要从事植物新品种 DUS 测试技术研究。

① 共同第一作者

② 通信作者 E-mail: chenfd@njau.edu.cn

conductivity, malondialdehyde content and soluble sugar content. The results show that there are some differences in related indexes of root and above-ground part, and leaf photosynthetic and gas exchange parameters of seedlings among different cultivars of *C. morifolium*. The results of correlation analysis show that there is a significantly ($P < 0.05$) or extremely significantly ($P < 0.01$) positive correlation of most related indexes of root with height, but no significant correlation with stem diameter and number of leaves per plant. Besides, there is an extremely significantly positive correlation of volume, fresh and dry weights of root per plant with fresh weight of above-ground part per plant with correlation coefficient of 0.598, 0.642 and 0.599, respectively, and an extremely significantly or significantly positive correlation with dry weight of above-ground part per plant with correlation coefficient of 0.736, 0.606 and 0.553, respectively. There is a significantly positive correlation of main root length with net photosynthetic rate and transpiration rate, of average length of root with water use efficiency, and of fresh weight of root per plant with transpiration rate with correlation coefficient of 0.475, 0.517, 0.570 and 0.477, respectively, and there is an extremely significantly positive correlation of dry weight of root per plant with transpiration rate, and of root activity with net photosynthetic rate and water use efficiency with correlation coefficient of 0.641, 0.877 and 0.814, respectively. The results of stress resistance evaluation show that average subordinate function values of cultivar 'Nannong Hongxia', 'Qx073' and 'Angelina' are 0.93, 0.93 and 0.72, respectively, therefore, drought resistance of the three cultivars of *C. morifolium* is the strongest. While those of cultivar 'Cayman' and 'Nannong Hongxia' are 0.82 and 0.70, respectively, therefore, heat tolerance of the two cultivars of *C. morifolium* is the strongest. In conclusion, the differences in related indexes of root of different cultivar seedlings of *C. morifolium* are obvious, and root growth status can affect growth and development of above-ground part. Both drought resistance and heat tolerance of cultivar 'Nannong Hongxia' are very strong, so it has a higher value in breeding resistance.

Key words: *Chrysanthemum morifolium* Ramat.; root; drought resistance; heat tolerance; correlation analysis; subordinate function method

根系既是植物吸收水分和养分的主要器官,又是植物体内多种激素、有机酸和氨基酸合成的重要场所,其形态和生理特性与地上部的生长发育、产量和品质均有密切关系,并且,根系的生长发育状况直接影响地上部的生物量^[1-2]。此外,根系也是植物直接感受土壤水分变化和吸收土壤水分的最主要器官,植物根系生长的深度、广度、数量和活力均与其植株的抗旱性密切相关^[3]。植物的根、冠发育及其功能平衡研究一直是研究者们关注的重点和热点^[4-5],并在根系结构与功能^[6]、根系研究方法^[7]、根系生长和代谢^[8]、根系与逆境^[9-10]、根系与生态^[11]等方面取得了较多的研究成果。目前,国内外植物学家、农学家和育种家已经从不同角度开展了植物根系形态特征及其与抗旱性关系等方面的研究^[12-15]。然而,关于观赏植物根系形态及其与植株抗旱性关系的研究却鲜有报道。

菊花(*Chrysanthemum morifolium* Ramat.)为菊科(Asteraceae)菊属(*Chrysanthemum* Linn.)多年生草本花卉,原产中国,是中国十大传统名花之一,具有丰富的种下变异,被誉为“世界两大花卉育种奇观之一”^[16]。随着全球气候的不断变化,干旱和热胁迫时

常发生,成为影响植物生长发育和产量的重要非生物因子。菊花的遗传背景复杂,并具有高度的自交不亲和性,在实际生产过程中一般在每年的4月至7月期间对其进行扦插繁殖,并且在整个扦插繁殖过程中水分管理非常重要,然而,每年的6月至7月期间气温明显上升,极易形成热胁迫,影响菊花插穗生根,在实际生产过程中常常通过人工浇水、搭建玻璃温室等操作来解决上述生产问题,但这些操作往往需要耗费大量的资金,增大了菊花扦插繁殖的生产成本,因此,筛选和培育抗旱、耐热的菊花新品种以及明确菊花根系与地上部生长特性和抗逆性间的关系是解决上述生产问题的最有效方法。

鉴于此,作者对6个切花秋菊品种幼苗的根系和地上部相关指标及叶片光合和气体交换参数进行了比较和相关性分析;并基于叶片相对含水量、相对电导率、丙二醛含量和可溶性糖含量4个生理生化指标,采用隶属函数法对供试6个菊花品种幼苗的抗旱性和耐热性进行了评价,以期探究菊花根系生长与地上部生长发育的关系,并筛选出具有较强抗旱性和耐热性的菊花品种,为菊花根系系列研究和抗性育种研究提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 材料

供试的6个菊花品种均属于切花秋菊,包括品种‘风车菊’(‘Pinwheel’)、‘馒头菊’(‘Cayman’)、‘大白托桂’(‘Qx073’)、‘南农红霞’(‘Nannong Hongxia’)、‘天使’(‘Angelina’)和‘红乒乓’(‘Red Ping-pong’),均由南京农业大学中国菊花种质资源保存中心提供。

1.2 方法

1.2.1 幼苗培养及相关指标测定

1.2.1.1 幼苗培养方法 于2013年5月10日选取生长状况基本一致、长度6 cm的插穗,置于装有V(蛭石):V(珍珠岩)=2:1混合基质的插床上进行扦插生根培养。于2013年6月1日,在每个品种中选取20株生长状况基本一致的健壮幼苗并定植于下口径4 cm、上口径5 cm、高9 cm的塑料杯(底部具孔)中,置于日温25℃、夜温16℃的恒温培养室进行培养,采取常规的栽培管理措施。

1.2.1.2 叶片光合和气体交换参数的测定 于2013年6月12日开始,在每天9:00至10:00,每个品种随机选择5株幼苗,使用LI-6400便携式光合作用测量系统(美国LI-COR公司)对样株自上而下第3或第4枚成熟叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)进行测定,水分利用效率(WUE)根据公式“ $WUE = Pn/Tr$ ”计算。测定时,设定内源光照强度为 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,CO₂浓度为空气中的CO₂浓度,温度为空气温度,空气相对湿度为70%。

1.2.1.3 根系和地上部相关指标的测定 在光合和气体交换参数测定完毕后,测量植株的单株根数、主根长、根长、单株根体积、单株根鲜质量和干质量以及根系活力,并计算平均根长;同时,对植株的株高、茎粗、单株叶数、单株地上部鲜质量和干质量进行统计和测量。其中,主根长为主根根尖至根基部的长度,根长为除主根外每条根的长度,株高为植株最高点至基部的自然高度。以上指标测量均使用精度1 mm的直尺;根体积测定采用排水法^[17];茎粗测量使用精度0.01 mm的游标卡尺;根系活力测定采用TTC法^[18]¹¹⁹⁻¹²⁰;根系和地上部鲜质量和干质量称量均使用精度0.01 g的天平,根系和地上部需先在105℃

条件下杀青0.5 h,再分别置于80℃或70℃条件下烘干至恒质量并称量其干质量。每个品种设置3个重复,每重复选取5株样株。

1.2.2 干旱和热胁迫方法及生理生化指标测定

1.2.2.1 干旱和热胁迫方法 于2013年7月10日选取生长状况基本一致、长度6 cm的插穗,置于装有V(蛭石):V(珍珠岩)=2:1混合基质的插床上进行扦插生根培养。于2013年8月1日,在每个品种中选取60株生长状况基本一致的健壮幼苗并定植于下口径4 cm、上口径5 cm、高9 cm的塑料杯(底部具孔)中,置于日温25℃、夜温16℃的恒温培养室进行培养,采取常规的栽培管理措施。于2013年8月12日,将每个品种的幼苗平均分成2份,分别进行干旱和热胁迫实验。

干旱胁迫实验设置对照组(CK)和干旱处理组2组,每个品种每组15株幼苗,对照组采取正常的栽培管理措施,干旱处理组于2013年8月11日起停止浇水,分别在胁迫2、4、6和8 d后每组随机选取3株幼苗,每个植株分别采集3枚无病虫害的成熟叶片,测量叶片的相对含水量、相对电导率、丙二醛含量和可溶性糖含量。

热胁迫实验设置对照组(CK)和热处理组2组,每个品种每组15株幼苗,对照组植株在日温25℃、夜温16℃的恒温培养室中进行培养,热处理组植株则在40℃光照培养箱中进行培养,为避免热胁迫引起的干旱影响,每隔1 d浇1次水,保证水分正常供应,分别在热胁迫1、2、3、4和5 d后每组随机选取3株幼苗,采集植株上无病虫害的成熟叶片,分别测定和计算叶片的相对含水量、相对电导率、丙二醛含量和可溶性糖含量。

1.2.2.2 叶片相关生理生化指标的测定 参照Hu等^[19]的方法称量每个样株3枚叶片的总鲜质量(FW)、饱和质量(TW)和烘干重量(DW),叶片相对含水量(RWC)根据公式“ $RWC = [(FW - DW)/(TW - DW)] \times 100\%$ ”计算。

相对电导率测定:将叶片用蒸馏水冲洗干净,并擦干表面水分;用打孔器打取叶圆片,放入含有8 mL去离子水的离心管中;室温浸泡24 h,用DDS-307型电导仪(上海雷磁仪器厂)测定浸提液的电导率(R1);沸水浴加热30 min,冷却后再次测定浸提液的电导率(R2);相对电导率根据公式“相对电导率= $(R1/R2) \times 100\%$ ”计算。

丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸法^{[18]260-261};可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^{[18]195-197}。

上述指标均重复测定3次,结果取平均值。

1.3 数据处理及分析

利用 EXCEL 2010 软件对实验数据进行简单的描述统计;使用 SPSS 17.0 统计分析软件对相关指标进行相关性分析,并采用 Duncan's 新复极差法对相关数据进行多重比较。

根据叶片的相对含水量、相对电导率、丙二醛含量和可溶性糖含量4个生理生化指标,采用隶属函数法^[20-21]对供试6个菊花品种幼苗的抗旱性和耐热性进行评价,其中,平均隶属函数值越大表示幼苗的抗逆性越强,反之则越弱;并且,参照符明联等^[22]的方法对6个菊花品种的抗旱性和耐热性进行评级。

2 结果和分析

2.1 不同菊花品种幼苗相关指标的比较

2.1.1 根系相关指标的比较 供试6个菊花品种幼苗根系相关指标(包括单株根数、主根长、平均根长、

单株根体积、单株根鲜质量和干质量及根系活力)的比较结果见表1。

由表1可见:在供试的6个菊花品种中,‘馒头菊’的单株根数最多(32.1),‘天使’和‘红乒乓’次之(分别为31.3和31.0),‘大白托桂’最少(28.8);并且,‘大白托桂’与‘馒头菊’、‘天使’和‘红乒乓’间单株根数的差异极显著($P<0.01$),但其余品种间单株根数的差异均不显著。‘大白托桂’的主根长最长(131.86 cm),‘风车菊’最短(101.62 cm),其余4个品种均略短于‘大白托桂’;并且,‘风车菊’与其余5个品种间主根长的差异极显著,但其余5个品种间主根长的差异均不显著。‘大白托桂’的平均根长最长(4.77 cm),‘南农红霞’次之(4.35 cm),‘风车菊’最小(3.46 cm);并且,多数品种间平均根长的差异极显著,仅‘天使’、‘红乒乓’和‘馒头菊’间平均根长的差异不显著。‘天使’的单株根体积最大(0.88 mL),‘风车菊’较小(0.64 mL),‘馒头菊’最小(0.57 mL);并且,‘天使’与‘风车菊’和‘馒头菊’间单株根体积的差异显著($P<0.05$),但与其余3个品种间单株根体积的差异均不显著。

表1 6个菊花品种幼苗根系相关指标的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Comparison on related indexes of root of six cultivar seedlings of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

品种 ²⁾ Cultivar ²⁾	单株根数 Number of roots per plant	主根长/cm Length of main root	平均根长/cm Average length of root	单株根体积/mL Volume of root per plant	单株根鲜质量/g Fresh weight of root per plant	单株根干质量/g Dry weight of root per plant	根系活 力/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ Root activity
Pi	29.0±1.2ABbc	101.62±4.64Bc	3.46±0.03Dd	0.64±0.04Abe	0.85±0.03Bb	0.09±0.00Aa	8.11±0.20Bb
Ca	32.1±1.7Aa	124.04±4.46Ab	3.88±0.09Cc	0.57±0.26Ac	0.57±0.04Cc	0.08±0.00Aa	7.50±0.10Cc
Qx	28.8±0.6Bc	131.86±3.64Aa	4.77±0.01Aa	0.82±0.03Aab	0.94±0.02Aa	0.10±0.01Aa	8.06±0.10Bb
Na	29.7±0.6ABbc	127.66±3.71Aab	4.35±0.21Bb	0.84±0.04Aab	0.92±0.01Aa	0.09±0.00Aa	8.69±0.00Aa
An	31.3±0.6Aab	123.62±2.52Ab	3.95±0.09Cc	0.88±0.02Aa	0.93±0.01Aa	0.09±0.00Aa	8.22±0.10Bb
Re	31.0±1.5Aab	123.02±4.03Ab	3.93±0.25Cc	0.81±0.03Aab	0.95±0.04Aa	0.10±0.00Aa	7.24±0.10Cd

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示在0.01和0.05水平上差异显著 Different capitals and lowercases in the same column indicate the significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

²⁾ Pi: ‘风车菊’ ‘Pinwheel’; Ca: ‘馒头菊’ ‘Cayman’; Qx: ‘大白托桂’ ‘Qx073’; Na: ‘南农红霞’ ‘Nannong Hongxia’; An: ‘天使’ ‘Angelina’; Re: ‘红乒乓’ ‘Red Ping-pong’.

由表1还可见:6个菊花品种幼苗的单株根鲜质量由大到小依次为‘红乒乓’、‘大白托桂’、‘天使’、‘南农红霞’、‘风车菊’、‘馒头菊’;并且,‘红乒乓’与‘风车菊’和‘馒头菊’间单株根鲜质量的差异极显著,但与其余3个品种间单株根鲜质量的差异不显著。同时,‘红乒乓’和‘大白托桂’的单株根干质量最大(均为0.10 g),‘馒头菊’的单株根干质量最小(0.08 g),但各品种间单株根干质量的差异均不显著。在供试的6个菊花品种中,‘南农红霞’的根系

活力最高($8.69\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$),‘红乒乓’最低($7.24\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$);并且,多数品种间根系活力的差异极显著,仅‘风车菊’、‘大白托桂’和‘天使’3个品种间以及‘馒头菊’和‘红乒乓’间根系活力的差异不显著。

2.1.2 地上部相关指标的比较 供试6个菊花品种幼苗地上部相关指标(包括株高、茎粗、单株叶数及单株地上部鲜质量和干质量)的比较结果见表2。

由表2可见:在供试的6个菊花品种中,‘红乒

兵’的株高最大(15.87 cm),‘馒头菊’较小(12.80 cm),‘风车菊’最小(12.67 cm);并且,‘红乒乓’与‘风车菊’和‘馒头菊’间株高的差异极显著,但与其余3个品种间株高的差异均不显著。6个菊花品种的茎粗为0.33~0.38 cm,其中,‘大白托桂’的茎粗最大,‘风车菊’最小;并且,各品种间茎粗的差异均不显著。‘天使’的单株叶数最多(21.3),‘馒头菊’最少(15.0);并且,‘天使’与‘红乒乓’间单株叶数的差异显著,但与其余4个品种间单株叶数的差异极

显著。

由表2还可见:‘天使’的单株地上部鲜质量最大(5.23 g),‘馒头菊’较小(3.66 g),‘风车菊’最小(3.58 g);并且,‘天使’与‘南农红霞’、‘馒头菊’和‘风车菊’间单株地上部鲜质量的差异极显著。‘天使’的单株地上部干质量最大(0.90 g),‘红乒乓’次之(0.81 g),‘馒头菊’最小(0.65 g);并且,‘天使’与‘红乒乓’间单株地上部干质量的差异显著,但与其余4个品种间单株地上部干质量的差异极显著。

表2 6个菊花品种幼苗地上部相关指标的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on related indexes of above-ground part of six cultivar seedlings of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

品种 ²⁾ Cultivar ²⁾	株高/cm Height	茎粗/cm Stem diameter	单株叶数 Number of leaves per plant	单株地上部鲜质量/g Fresh weight of above- ground part per plant	单株地上部干质量/g Dry weight of above- ground part per plant
Pi	12.67±0.58Bb	0.33±0.02Aa	17.3±1.0BCcd	3.58±0.30Cc	0.66±0.04Cd
Ca	12.80±0.70Bb	0.35±0.04Aa	15.0±1.2Cd	3.66±0.29Cc	0.65±0.05Cd
Qx	15.60±0.30Aa	0.38±0.02Aa	18.2±0.6Bbc	4.76±0.19ABab	0.77±0.03Bbc
Na	15.37±1.06Aa	0.37±0.01Aa	17.5±1.0BCcd	4.44±0.10Bb	0.73±0.03Bc
An	15.20±0.10Aa	0.34±0.02Aa	21.3±1.2Aa	5.23±0.41Aa	0.90±0.06Aa
Re	15.87±0.38Aa	0.36±0.04Aa	19.0±1.0ABb	4.87±0.15ABab	0.81±0.01Ab

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示在0.01和0.05水平上差异显著 Different capitals and lowercases in the same column indicate the significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

²⁾ Pi: ‘风车菊’ ‘Pinwheel’; Ca: ‘馒头菊’ ‘Cayman’; Qx: ‘大白托桂’ ‘Qx073’; Na: ‘南农红霞’ ‘Nannong Hongxia’; An: ‘天使’ ‘Angelina’; Re: ‘红乒乓’ ‘Red Ping-pong’.

2.1.3 叶片光合和气体交换参数的比较 供试6个菊花品种幼苗叶片光合和气体交换参数(包括净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率)的比较结果见表3。

由表3可见:6个菊花品种的净光合速率从大到小依次为‘南农红霞’、‘大白托桂’、‘天使’、‘风车菊’、‘馒头菊’、‘红乒乓’;其中,‘南农红霞’的净光合速率显著高于‘大白托桂’和‘天使’,并极显著高

于‘风车菊’、‘馒头菊’和‘红乒乓’,而‘大白托桂’和‘天使’间以及‘风车菊’和‘馒头菊’间净光合速率的差异均不显著,但这4个品种的净光合速率均极显著高于‘红乒乓’。‘风车菊’、‘馒头菊’和‘南农红霞’的蒸腾速率最大(均为 $1.06 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),‘天使’次之,‘大白托桂’和‘红乒乓’最小(均为 $1.03 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。6个菊花品种的气孔导度为 $0.73 \sim 0.77 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其中,‘大白托桂’的气

表3 6个菊花品种幼苗叶片光合和气体交换参数的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Comparison on leaf photosynthetic and gas exchange parameters of six cultivar seedlings of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

品种 ²⁾ Cultivar ²⁾	净光合速率/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Net photosynthetic rate	蒸腾速率/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Transpiration rate	气孔导度/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Stomatal conductance	水分利用效率/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ Water use efficiency
Pi	12.07±0.58Bbc	1.06±0.08Aa	0.74±0.00Aa	11.36±1.17BCbc
Ca	11.89±0.77Bc	1.06±0.11Aa	0.73±0.01Aa	11.22±1.06BCcd
Qx	12.42±1.08ABb	1.03±0.09Ab	0.77±0.01Aa	12.03±1.58Aa
Na	12.82±1.01Aa	1.06±0.09Aa	0.75±0.01Aa	12.13±1.00Aa
An	12.29±0.59ABb	1.04±0.12Aa	0.75±0.01Aa	11.80±0.99ABab
Re	11.24±0.28Cd	1.03±0.03Ab	0.75±0.01Aa	10.87±0.99Cd

¹⁾ 同列中不同的大写和小写字母分别表示在0.01和0.05水平上差异显著 Different capitals and lowercases in the same column indicate the significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

²⁾ Pi: ‘风车菊’ ‘Pinwheel’; Ca: ‘馒头菊’ ‘Cayman’; Qx: ‘大白托桂’ ‘Qx073’; Na: ‘南农红霞’ ‘Nannong Hongxia’; An: ‘天使’ ‘Angelina’; Re: ‘红乒乓’ ‘Red Ping-pong’.

孔导度最大,‘馒头菊’最小;各品种间的气孔导度总体差异不显著。在供试的6个菊花品种中,‘南农红霞’的水分利用效率最大($12.13 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$),‘大白托桂’和‘天使’次之(分别为 12.03 和 $11.80 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$),且这3个品种间水分利用效率的差异不显著;‘风车菊’和‘馒头菊’的水分利用效率较小(分别为 11.36 和 $11.22 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$),且这2个品种间水分利用效率的差异也不显著,但极显著小于‘南农红霞’和‘大白托桂’;‘红乒乓’的水分利用效率最小($10.87 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$),极显著低于‘南农红霞’、‘大白托桂’和‘天使’,并显著低于‘风车菊’,仅与‘馒头菊’的差异不显著。

2.2 菊花幼苗根系与地上部和叶片相关指标的相关性分析

2.2.1 根系与地上部相关指标的相关性分析

菊花幼苗根系与地上部相关指标的相关性分析结果见表4。结果表明:菊花幼苗的单株根数与株高呈极显著正相关($P < 0.01$) (相关系数为 0.599),与单株地上

部鲜质量呈显著正相关($P < 0.05$) (相关系数为 0.508);平均根长与株高呈极显著正相关(相关系数为 0.611),与茎粗呈显著正相关(相关系数为 0.526);单株根体积与株高和单株叶数呈显著正相关(相关系数分别为 0.563 和 0.534),与单株地上部鲜质量和干质量呈极显著正相关(相关系数分别为 0.598 和 0.736);单株根鲜质量与株高、单株叶数、单株地上部鲜质量和干质量呈极显著正相关(相关系数分别为 0.688 、 0.601 、 0.642 和 0.606),与茎粗呈不显著正相关;单株根干质量与株高、单株地上部鲜质量和干质量呈极显著正相关(相关系数分别为 0.692 、 0.599 和 0.553),与茎粗和单株叶数呈不显著正相关。并且,菊花幼苗的主根长和根系活力与地上部相关指标的相关性均不显著。

2.2.2 根系与叶片光合和气体交换参数的相关性分析

菊花幼苗根系与叶片光合和气体交换参数的相关性分析结果见表5。结果表明:菊花幼苗的主根长与净光合速率和水分利用效率呈显著正相关,相关系

表4 菊花幼苗根系与地上部相关指标的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis on related indexes of root with those of above-ground part of seedlings of *Chrysanthemum morifolium* Ramat.¹⁾

指标 Index	与地上部各指标的相关系数 Correlation coefficient with different indexes of above-ground part				
	株高 Height	茎粗 Stem diameter	单株叶数 Number of leaves per plant	单株地上部鲜质量 Fresh weight of above-ground part per plant	单株地上部干质量 Dry weight of above-ground part per plant
单株根数 Number of roots per plant	0.599**	0.401	0.047	0.508*	0.345
主根长 Length of main root	0.201	0.331	0.046	0.064	0.082
平均根长 Average length of root	0.611**	0.526*	0.062	0.454	0.235
单株根体积 Volume of root per plant	0.563*	-0.065	0.534*	0.598**	0.736**
单株根鲜质量 Fresh weight of root per plant	0.688**	0.043	0.601**	0.642**	0.606**
单株根干质量 Dry weight of root per plant	0.692**	0.082	0.415	0.599**	0.553*
根系活力 Root activity	0.031	0.152	0.115	0.036	0.090

¹⁾ *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表5 菊花幼苗根系相关指标与叶片光合和气体交换参数的相关性分析¹⁾

Table 5 Correlation analysis on related indexes of root with leaf photosynthetic and gas exchange parameters of seedlings of *Chrysanthemum morifolium* Ramat.¹⁾

指标 Index	与叶片各参数的相关系数 Correlation coefficient with different parameters of leaf			
	净光合速率 Net photosynthetic rate	蒸腾速率 Transpiration rate	气孔导度 Stomatal conductance	水分利用效率 Water use efficiency
单株根数 Number of roots per plant	0.208	-0.367	0.174	0.341
主根长 Length of main root	0.475*	0.115	-0.113	0.517*
平均根长 Average length of root	0.437	-0.367	0.200	0.570*
单株根体积 Volume of root per plant	0.260	-0.441	0.080	0.419
单株根鲜质量 Fresh weight of root per plant	0.132	0.477*	0.146	0.306
单株根干质量 Dry weight of root per plant	-0.157	0.641**	0.347	0.079
根系活力 Root activity	0.877**	0.153	-0.040	0.814**

¹⁾ *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

数分别为 0.475 和 0.517;平均根长与水分利用效率呈显著正相关,相关系数为 0.570;单株根鲜质量与蒸腾速率呈显著正相关,相关系数为 0.477;单株根干质量与蒸腾速率呈极显著正相关,相关系数为 0.641;根系活力与净光合速率和水分利用效率呈极显著正相关,相关系数分别为 0.877 和 0.814。并且,菊花幼苗的单株根数和单株根体积与叶片光合和气体交换参数的相关性均不显著。

2.3 不同菊花品种幼苗的抗性评价

2.3.1 抗旱性评价 基于 6 个菊花品种幼苗叶片相对含水量、相对电导率、丙二醛含量和可溶性糖含量

的抗旱性评价结果见表 6。

由表 6 可见:供试 6 个菊花品种幼苗叶片上述 4 个生理生化指标的平均隶属函数值(AS)为 0.08~0.93,极差为 0.85,三等分值为 0.283,据此获得不同抗旱等级的 AS 值范围:强抗, $AS \geq 0.647$; 较抗, $0.363 \leq AS < 0.647$; 不抗, $AS < 0.363$ 。据此判定品种‘南农红霞’、‘大白托桂’和‘天使’的抗旱性最强,为强抗旱品种;品种‘馒头菊’和‘红乒乓’的抗旱性最差,为不抗旱品种;品种‘风车菊’的抗旱性居中,为较抗旱品种。

表 6 基于叶片 4 个生理生化指标隶属函数值的 6 个菊花品种幼苗抗旱性评价结果

Table 6 Evaluation result of drought resistance of six cultivar seedlings of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. according to subordinate function values of four physiological and biochemical indexes of leaf

品种 Cultivar	各指标的隶属函数值 ¹⁾ Subordinate function value of different indexes ¹⁾				平均隶属函数值 Average subordinate function value	抗旱等级 Grade of drought resistance
	RWC	REC	MDA	SSC		
风车菊 Pinwheel	0.75	0.20	0.70	0.05	0.42	较抗 Relative resistance
馒头菊 Cayman	0.11	0.16	0.89	0.00	0.29	不抗 No resistance
大白托桂 Qx073	0.89	0.84	1.00	1.00	0.93	强抗 Strong resistance
南农红霞 Nannong Hongxia	1.00	1.00	0.95	0.78	0.93	强抗 Strong resistance
天使 Angelina	0.68	0.49	0.71	1.00	0.72	强抗 Strong resistance
红乒乓 Red Ping-pong	0.00	0.00	0.00	0.32	0.08	不抗 No resistance

¹⁾ RWC: 相对含水量 Relative water content; REC: 相对电导率 Relative electrical conductivity; MDA: 丙二醛含量 Malondialdehyde content; SSC: 可溶性糖含量 Soluble sugar content.

2.3.2 耐热性评价 基于 6 个菊花品种幼苗叶片相对含水量、相对电导率、丙二醛含量和可溶性糖含量的耐热性评价结果见表 7。

由表 7 可见:供试 6 个菊花品种幼苗叶片上述 4 个生理生化指标的 AS 值为 0.12~0.82,极差为 0.70,三等分值为 0.233。据此获得不同耐热等级的

AS 值范围:强耐, $AS \geq 0.587$; 较耐, $0.353 \leq AS < 0.587$; 不耐, $AS < 0.353$ 。据此判定品种‘馒头菊’和‘南农红霞’的耐热性最强,为强耐热品种;品种‘大白托桂’和‘红乒乓’的耐热性最差,为不耐热品种;品种‘风车菊’和‘天使’的耐热性居中,为较耐热品种。

表 7 基于叶片 4 个生理生化指标隶属函数值的 6 个菊花品种幼苗耐热性评价结果

Table 7 Evaluation result of heat tolerance of six cultivar seedlings of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. according to subordinate function values of four physiological and biochemical indexes of leaf

品种 Cultivar	各指标的隶属函数值 ¹⁾ Subordinate function value of different indexes ¹⁾				平均隶属函数值 Average subordinate function value	耐热等级 Grade of heat tolerance
	RWC	REC	MDA	SSC		
风车菊 Pinwheel	0.54	0.36	0.39	0.67	0.49	较耐 Relative tolerance
馒头菊 Cayman	0.97	0.74	0.57	1.00	0.82	强耐 Strong tolerance
大白托桂 Qx073	0.37	0.00	1.00	0.00	0.34	不耐 No tolerance
南农红霞 Nannong Hongxia	1.00	1.00	0.00	0.81	0.70	强耐 Strong tolerance
天使 Angelina	0.41	0.01	0.70	0.47	0.40	较耐 Strong tolerance
红乒乓 Red Ping-pong	0.00	0.14	0.25	0.08	0.12	不耐 No tolerance

¹⁾ RWC: 相对含水量 Relative water content; REC: 相对电导率 Relative electrical conductivity; MDA: 丙二醛含量 Malondialdehyde content; SSC: 可溶性糖含量 Soluble sugar content.

3 讨论和结论

3.1 菊花幼苗根系与地上部和叶片相关指标的关系

植物根系和地上部生长是相互促进、相互制约、相互交替的关系。根系为地上部生长提供水分和矿质营养,同时,地上部为根系生长提供光合产物。根系不仅是植物的重要吸收器官,同时也是重要的代谢器官,其生长状况直接决定了植物地上部的生长和产量^[23]。了解植物根系与地上部生长的相关性对于制定合理的栽培管理措施和培育优质壮苗具有重要意义。为了减少环境因子对根系和地上部生长的影响,本研究对人为控制条件下生长的 6 个菊花品种扦插苗的根系与地上部相关指标的关系进行了研究。结果显示:菊花幼苗的主根长和根系活力与地上部相关指标均呈不显著正相关,而单株根数、平均根长、单株根体积、单株根鲜质量和干质量与地上部相关指标总体上呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)正相关,说明菊花根系的生长状况直接影响地上部的生长,总体表现为单株根数越多、平均根长越长、单株根体积越大、单株根鲜质量和干质量越大,植株的株高越高、茎粗越粗、单株叶数越多、单株地上部鲜质量和干质量越大。

本研究结果表明:菊花幼苗根系的生长状况对叶片光合和气体交换参数也有一定的影响。其中,主根长和根系活力与净光合速率分别呈显著和极显著正相关,主根长、平均根长和根系活力与水分利用效率的相关性也达到显著或极显著水平,说明扎根较深、根系活力较大的菊花植株具有较高的净光合速率和水分利用效率,这是因为扎根越深,根系吸收深层土壤中水分的能力就越强,越利于植株维持较高的净光合速率和水分利用效率。单株根系鲜质量和干质量与蒸腾速率分别呈显著和极显著正相关,说明具有发达根系的菊花植株的蒸腾速率也较大。

3.2 菊花幼苗根系与抗逆性的关系

根系是植物吸收水分和进行呼吸作用的主要器官,其发育状况与植物地上部生长及抵抗外界胁迫的能力有密切关系。相关研究结果表明:根系形态和生根方式能够影响植株对土壤中水分的吸收,通常情况下,根系大、深、密是作物具有抗旱能力的基本特征^[24],并且,较多的深层根对植物抗旱性更为重要^[25]。李德顺等^[3]的研究结果表明:在苗期和拔节

期,玉米(*Zea mays* Linn.)的最大根长与其耐旱指数(DTIv)的关联度最大,说明玉米的扎根深度与其抗旱性关系密切,可作为抗旱性鉴定的重要指标;而单株的根体积、根干质量、根冠比和根数可作为抗旱性鉴定指标,根系总吸收面积、活跃吸收面积和伤流量则可作为抗旱性鉴定的参考指标。在干旱胁迫条件下,植物最直观的反应首先表现为植株外部形态特征的变化^[26],其次表现为植物各项生理生化指标的变化^[27-28]。为了解菊花根系与抗旱性的关系,对供试 6 个菊花品种幼苗的 7 项根系相关指标与其抗旱性进行了相关性分析,结果表明:菊花幼苗根系活力与其抗旱性呈极显著正相关,且相关系数最大(0.819),这可能是因为根系活力较强的菊花幼苗一方面吸水能力强,能够更加有效地吸收土壤中的水分,另一方面可以确保植株在受到干旱胁迫时保持正常的呼吸作用,从而减小干旱胁迫对菊花幼苗造成的伤害。本研究中,抗旱性较强的菊花品种在干旱胁迫后仍然能保持较高的根系活力,这一结果也验证了上述观点。另外,菊花幼苗的平均根长和主根长与其抗旱性分别呈极显著和显著正相关,且相关系数较大(分别为 0.660 和 0.582),说明菊花幼苗的根系扎根越深,其抗旱性越强,这可能是因为较深的根系更利于植株吸收深层土壤中的水分,提高植株对土壤中水分的利用率,从而降低干旱胁迫对菊花幼苗生长的危害。

相关研究结果^[29-30]表明:植物根系与其耐热性密切相关。为了解菊花根系与耐热性的关系,对供试 6 个菊花品种幼苗的 7 项根系相关指标与其耐热性进行了相关性分析,结果表明:菊花幼苗的单株根系鲜质量和干质量与其耐热性均呈极显著正相关,相关系数分别为 0.719 和 0.718,这可能是因为根系的生长发育直接影响地上部的生长状况,具有发达根系的菊花幼苗的地上部也较发达,使植株具有较强的蒸腾作用,从而通过蒸腾作用来降温,避免高温对植株的伤害。然而,菊花幼苗的主根长和平均根长与其耐热性的相关系数却较小,分别仅 0.103 和 -0.076,说明菊花幼苗的根系长度对其耐热性没有明显影响,间接说明菊花的抗旱性和耐热性机制不同。

值得注意的是,本研究只涉及 6 个菊花品种,且根系相关指标测定与抗旱性和耐热性鉴定使用的幼苗并非同一批植株,因此,仍需要对菊花根系与抗旱性和耐热性的关系进行更为详细、科学的深入研究。

3.3 结论

综合分析结果表明:不同菊花品种幼苗的根系形态指标和根系活力有明显差异,从而造成其吸收和利用土壤水分的能力各异,并进一步影响地上部的生长发育。总体来看,‘南农红霞’的抗旱性和耐热性均很强,具有潜在的抗性育种价值。

参考文献:

- [1] 扎西,米玛穷拉. 4种豆科牧草根系的观测[J]. 中国草业科学, 1987, 4(4): 56-57.
- [2] 赵明轩,谭成虎,何得元,等. 驴驹蒿根系的研究[J]. 草业科学, 1990, 7(3): 55-57.
- [3] 李德顺,刘芳,马永光. 玉米根系与抗旱性关系研究[J]. 杂粮作物, 2010, 30(3): 195-197.
- [4] 冯广龙,罗远培. 土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 96-103.
- [5] SIDDIQUE K H M, BELFORD R K, TENNANT D. Root : shoot ratios of old and modern, tall and semi-dwarf wheats in a mediterranean environment[J]. Plant and Soil, 1990, 121: 89-98.
- [6] 单立山. 西北典型荒漠植物根系形态结构和功能及抗旱生理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学林学院, 2013.
- [7] 朱衍杰,张秀省,穆红梅,等. 植物根系生长与研究方法的进展[J]. 北方园艺, 2012(20): 176-179.
- [8] 王德玉,孙艳,郑俊鸾,等. 土壤紧实胁迫对黄瓜根系生长及氮代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1394-1400.
- [9] 王树凤,胡韵雪,孙海菁,等. 盐胁迫对2种栎树苗期生长和根系生长发育的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 1021-1029.
- [10] 蔡丽平,吴鹏飞,侯晓龙,等. 类芦根系对不同强度干旱胁迫的形态学响应[J]. 中国农学通报, 2012, 28(28): 44-48.
- [11] 郭京衡,曾凡江,李崇君,等. 塔克拉玛干沙漠南缘三种防护林植物根系构型及其生态适应策略[J]. 植物生态学报, 2014, 38(1): 36-44.
- [12] 王海林,公保才让. 高寒牧区栽培苜蓿根系的研究[J]. 草业与畜牧, 2007(8): 7-9.
- [13] 关军锋,李广敏. 干旱胁迫下根系功能的表达与调节[J]. 中国基础科学, 2001(3): 25-28.
- [14] 李鲁华,李世清,翟军海,等. 小麦根系与土壤水分胁迫关系的研究进展[J]. 西北植物学报, 2001, 21(1): 1-7.
- [15] STUEDLE E. Water uptake by roots: effects of water deficit[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51: 1531-1542.
- [16] 陈俊愉. 中国花卉品种分类学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 218.
- [17] 西北农业大学植物生理生化教研组. 植物生理学实验指导[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1987: 77-89.
- [18] 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.
- [19] HU L X, WANG Z L, DU H M, et al. Differential accumulation of dehydrins in response to water stress for hybrid and common bermudagrass genotypes differing in drought tolerance[J]. Journal of Plant Physiology, 2010, 167: 103-109.
- [20] 陶向新. 模糊数学在农业科学中的初步应用[J]. 沈阳农学院学报, 1982(2): 96-107.
- [21] 龚明. 作物抗性鉴定方法与指标及其综合评价[J]. 云南农业大学学报, 1989, 4(1): 73-81.
- [22] 符明联,李根泽,杨清辉,等. 隶属函数法鉴定油菜甘芥种间杂交后代的抗旱性[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(4): 368-373.
- [23] 王晓光,曹敏建,王伟,等. 钾对大豆根系形态与生理特性的影响[J]. 大豆科学, 2005, 24(2): 126-129, 134.
- [24] HURD E A. Phenotype and drought tolerance in wheat [J]. Agricultural Meteorology, 1974, 14: 39-45.
- [25] 梁银丽,陈培元. 旱地小麦品种的特征特性[C]//山仑,陈培元. 旱地农业生理生态基础. 北京: 科学出版社, 1998: 259-266.
- [26] GUHA A, SENGUPTA D, RASINENI G K, et al. An integrated diagnostic approach to understand drought tolerance in mulberry (*Morus indica* L.) [J]. Flora, 2010, 205: 144-151.
- [27] YANG F, HU J J, LI J L, et al. Chitosan enhances leaf membrane stability and antioxidant enzyme activities in apple seedlings under drought stress[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2009, 58: 131-136.
- [28] KHAN H R, PAULL J G, SIDDIQUE K H M, et al. Faba bean breeding for drought-affected environments: a physiological and agronomic perspective [J]. Field Crops Research, 2010, 115: 279-286.
- [29] 尚庆茂,李佐. 根际水分状况对菜豆蒸腾抗热效果的影响[C]//侯喜林,常有宏. 园艺学进展: 第2辑. 南京: 东南大学出版社, 1998: 594-597.
- [30] 缪旻珉,张玉华,蒋亚华,等. 黄瓜耐热性与其叶片、根系和花粉性状关系的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2005, 26(2): 83-85.

(责任编辑: 佟金凤)