

保水技术对干旱胁迫下桔梗种子萌发 及幼苗生长和生理特征的影响

李柯妮, 王康才*, 牛灵慧, 凌 峰, 梁永富

(南京农业大学 园艺学院, 南京 210095)

摘 要:以完整饱满的桔梗种子为材料, 采用沙培控水方法进行盆栽实验, 在沙粒(500 g/盆)中分别均匀混入不同浓度梯度的保水剂(SAP)、保水剂与 Na 基膨润土(SAP+Na)、保水剂与 Ca 基膨润土(SAP+Ca)共 3 种保水处理技术, 研究了不同保水技术对桔梗种子萌发以及幼苗生长、抗旱生理指标的影响。结果显示: 1 g SAP、(1+9)~(1.5+2) g SAP+Na、(1+9) g SAP+Ca 均可显著提高桔梗种子的萌发, 促进根系的生长速率, 增加叶片中的相对含水量, 增强叶片 SOD、CAT 活性, 提高叶片游离脯氨酸、可溶性多糖及可溶性蛋白含量, 减少干旱胁迫对细胞膜的破坏, 有效降低了相对电导率, 同时, 处理提高了叶片中叶绿素与类胡萝卜素含量, 增强了叶片产生光合色素的能力, 有效增加 ASA、GSH 的含量, 从而可抵御干旱造成的氧化胁迫, 但随着混施浓度的增大, 桔梗叶面抵御干旱胁迫的能力则会下降。研究表明, 混施一定浓度 SAP、SAP+Na 和 SAP+Ca 可有效提供桔梗种子萌发所需适宜环境, 减轻干旱胁迫对桔梗幼苗的伤害, 且保水剂中混施 Na 基膨润土或者 Ca 基膨润土比单纯施保水剂效果更加明显。

关键词: 桔梗; 保水剂; 膨润土; 保水技术; 种子萌发; 抗旱性

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Water Conservation Technique on Seeds Germination, Seedling Growth and Physiological Characteristics of *Platycodon grandiflorum*

LI Keni, WANG Kangcai*, NIU Linghui, LING Feng, LIANG Yongfu

(Institute of Chinese Medicinal Materials, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: An experiment with complete the full *Platycodon grandiflorum* seeds as the material, water control in sand culture method is adopted to improve the potted experiment, in the grains of sand(500 g/pot) are mixed with gradient process of super absorbent polymers (SAP), super absorbent polymers and Na bentonite (SAP+Na), super absorbent polymers and Ca bentonite (SAP+Ca), a total of three kinds of water conservation technique. This paper studied the effects of 3 water conservation techniques and different concentrations on the germination of seed and the seedling drought resistance of *P. grandiflorum* by planting in sands. The results showed that the 1g SAP, (1+9)~(1.5+2) g SAP+Na and (1+9) g SAP+Ca was beneficial to seed germination rate, root growth rate and increased leaf relative water content of *P. grandiflorum*, enhanced the activities of SOD and CAT, the contents of proline, soluble polysaccharide and soluble protein, effectively reduced the damage of heat stress on cell membrane. At the same time, the con-

收稿日期: 2015-07-26; 修改稿收到日期: 2015-10-15

基金项目: 工信部桔梗规范化与规模化生产基地建设项目(2012)

作者简介: 李柯妮(1991—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事药用植物栽培与生理方面的研究。E-mail: 2013104128@njau.edu.cn

* 通信作者: 王康才, 教授, 硕士生导师, 主要从事药用植物栽培与生理方面的研究。E-mail: wangkc@njau.edu.cn

tents of chlorophyll and carotenoid, the efficiency of leaf photosynthesis were increased, the ASA and GSH contents were also increased, and thus effectively resisted the oxidative stress caused by drought stress. However, with the increasing concentration of spraying, *P. grandiflorum* decreased the ability to resist drought stress. In conclusion, mix a certain concentration of SAP, SAP+Na and SAP+Ca can effectively provide good environment for seed germination, alleviate the harm for *P. grandiflorum* seedling by drought stress. Mixed super absorbent polymers and Na(Ca) bentonite is more efficient than simply mixed super absorbent polymers.

Key words: *Platycodon grandiflorum*; super absorbent polymers; bentonite; water conservation technique; seed germination; drought resistance

桔梗 [*Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC.] 为桔梗科桔梗属多年生草本植物, 既是一种资源植物又是一种药、食、赏兼用的经济植物, 以根入药, 为常用大宗药材, 具有化痰止咳、利咽开音、宣畅肺气、排脓消痈的功效。桔梗分布较广, 南北皆可种植, 目前栽培桔梗以内蒙、山东、安徽、湖北、江苏等省产量较大。桔梗种子细小, 发芽周期长, 易造成种子发霉, 继而失去发芽力, 使得桔梗生产中一直存在种源不足的问题^[1]。桔梗种子库通常分布在土壤表层, 由于春季多风、温度回升快、降雨也逐渐增多, 导致土壤种子处于干湿交替的环境之中^[2], 使种子萌发阶段容易出现“落干”现象, 遭受干旱胁迫, 对其种子正常萌发生长造成影响; 同时, 桔梗出苗后因幼苗非常细弱加上春旱, 就会造成幼苗成苗率低且易感染病害, 导致成苗不易, 影响了桔梗自身的产量与品质, 大田栽培中水分也是制约着桔梗产业发展的重要因素之一。因此, 提高土壤表层的保水能力, 减轻桔梗种子萌发时遭遇的干旱胁迫, 增加桔梗幼苗的抗旱性, 对桔梗大田生产具有重要的意义。

近年来, 关于植物抗旱性的研究越来越受到重视, 其中保水剂和膨润土是国家鼓励推广并重点支持的新型农用制品, 两者在促进植物生长发育, 提高土壤的吸水、保水和保肥等方面已有较多的研究。保水剂是一种吸水性很强的新型高分子聚合物, 当前使用的多是利用强吸水性树脂(SAP)制成的高分子聚合物^[3], 适宜浓度的保水剂能促进植物的萌发、生长发育以及产量^[4-6]。膨润土是一种片层结构的硅酸盐, 主要成分是蒙脱石^[7], 研究最为深入的是膨润土在改良土壤方面的作用^[8-9]。目前, 对桔梗种子的研究主要集中在种子质量、种子萌发特性及萌发条件等方面^[10-12], 而桔梗种子及幼苗耐旱性研究较少。据报道, 保水剂施用得当, 可促进植物根系生长, 但是在土壤含水量不足的情况下, 则会存在与种子争水问题^[13], 影响种子吸水萌发及出苗; 中国膨润土资源丰富, 价格低廉, 采选加工方法较为简单,

且对重金属有良好的吸附性能^[14]。据此, 本实验通过与沙粒混施不同质量浓度的保水剂(SAP), 在保水剂中添加 Na 基膨润土(SAP+Na) 与 Ca 基膨润土(SAP+Ca), 根据桔梗种子在大田生产萌发过程中遇到的实际问题, 研究 3 种不同保水处理对干旱胁迫条件下桔梗种子萌发、幼苗抗旱性的影响, 为桔梗规范化种植提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

供试材料为桔梗科桔梗属桔梗 [*Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC.] 的种子, 由王康才教授鉴定, 来自内蒙古自治区赤峰市敖汉旗古鲁板蒿桔梗种植基地, 于 2014 年 10 月种子自然脱落时采收。保水剂为正能量抗旱保水剂(SAP), 由临沂沃华生物工程有限公司生产; 钠基膨润土和钙基膨润土由巩义市元亨净水材料厂提供。

1.2 实验设计

本实验于 2015 年 3 月 23 日至 5 月 30 日在南京农业大学温室大棚内进行, 设置种子萌发和幼苗耐旱性两组实验, 它们的处理设置、培养条件完全相同。试验选用形态一致、大小相近、饱满的桔梗种子, 分别于 3 月 23 日(萌发试验)和 4 月 14 日(幼苗耐旱试验)播种于 15 cm×12 cm 塑胶盆中, 供试处理剂 3 种, 设置 3 类处理。(1)保水剂处理(SAP): 设 0.3、0.5、1、1.5、2 g 共 5 个梯度水平, 分别表示为 SAP_{0.3}、SAP_{0.5}、SAP_{1.0}、SAP_{1.5}、SAP_{2.0}; (2)保水剂加 Na 基膨润土混合处理(SAP+Na): 设 0.3+3 g、0.5+6 g、1.0+9 g、1.5+12 g、2.0+15 g 共 5 个梯度水平, 分别表示为 SAP_{0.3}+Na₃、SAP_{0.5}+Na₆、SAP_{1.0}+Na₉、SAP_{1.5}+Na₁₂、SAP_{2.0}+Na₁₅; (3)保水剂加 Ca 基膨润土混合处理(SAP+Ca): 设 0.3+3 g、0.5+6 g、1.0+9 g、1.5+12 g、2.0+15 g 共 5 个梯度水平, 分别表示为 SAP_{0.3}+Ca₃、SAP_{0.5}+Ca₆、SAP_{1.0}+Ca₉、SAP_{1.5}+Ca₁₂、SAP_{2.0}+Ca₁₅。同

时,实验设置两组不添加任何处理剂的对照 CK₁ 和 CK₂,CK₁ 随处理组进行干旱胁迫,CK₂ 用称重法正常补充水分。每组实验各有 17 个处理,每个处理 4 盆。塑料盆中装入 500 g 的砂粒(洗净烘干消毒)作为培养基质,分别用上述各处理保水剂和膨润土与砂粒培养基质搅拌均匀,均匀地铺在盆中。每盆播种桔梗种子 200 粒,播种深度 1~2 cm,浇定量的蒸馏水 350 mL(依据田间最大持水量)称重后置于光照培养箱中(GXZ 智能型光照培养箱,宁波江南仪器厂),在光照度 3 600 lx、温度 25 ℃ 条件下开始培养。

萌发实验组从 3 月 30 日种子萌发开始,连续统计 5 d 发芽种子数,期间除了 CK₂ 用称重法正常补充水分外,其余处理自播种之日浇水后均不补充水分;幼苗耐旱性实验组,培养期间每隔 3 d 用称重法补充一次水分,于 4 月 22 日桔梗出现萌发迹象之后补充最后一次水分,于 4 月 23 日开始进行耐旱处理,期间除了 CK₂ 用称重法正常补充水分外,其余处理均不浇水,并在耐旱处理 10 d(5 月 3 日)之后开始取样测定相关指标。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 种子发芽率及种子活力 于 3 月 30 日萌发开始连续统计 5 d 种子发芽数,计算发芽率(%)、发芽势(%)以及发芽指数。计算公式如下:

发芽势(%) = 初次记数日发芽种子总数 / 供试种子粒数 × 100%

发芽率(%) = $n/N \times 100\%$

式中, n 为发芽终期全部正常发芽的种子数, N 为供试种子总数。

发芽指数(Gi) = $\sum(Gt/Dt)$

式中, Gt 为在 t d 的种子发芽数, Dt 为对应的种子发芽天数。

1.3.2 幼苗根长和叶片相对含水量 幼苗耐旱性处理结束后开始用电子游标卡尺测定幼苗根长和茎长,并计算两者的比值,每个处理重复 10 次。同时,取最新完全展开的叶片,先测定叶片鲜重(FW),然后将叶片置于 4 ℃ 完全黑暗的环境中吸水 6 h 后测定饱和重(TW),再将叶片置于 60 ℃ 烘箱中 48 h 后测定干重(DW),最后用以下公式进行计算叶片相对含水量(RWC):

$RWC(\%) = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100\%$

1.3.3 生理生化指标 取耐旱处理组幼苗新鲜叶片测定相关生理指标。可溶性蛋白质含量测定采用 Bradford 考马斯亮蓝 G-250 染色法;丙二醛(MDA)

含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法;脯氨酸含量测定采用茚三酮法;可溶性多糖含量采用蒽酮比色法测定。超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性测定分别采用氮蓝四唑(NBT)法和高锰酸钾滴定法;抗坏血酸(ASA)含量测定采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法;相对电导率的测定采用电导仪法。以上指标均采用王学奎^[15]的实验方法。还原型谷胱甘肽(GSH)含量测定采用 5,5-二硫二硝基苯甲酸(DTNB)法^[16]。光合色素含量采用 95%乙醇研磨法进行测定^[15]。每个指标重复测定 3 次。

1.4 统计分析

试验采用完全随机设计,所有试验处理的生长、生理指标数据利用 SPSS(19.0)进行单因素方差分析,对处理之间以及同一处理随时间变化的差异性多重比较采用 LSD(Least significant difference)分析。所有图片均采用 Excel 2003 制作。

2 结果与分析

2.1 不同保水方式对干旱胁迫下桔梗种子萌发与种子活力的影响

发芽势是反映种子发芽能力的指标,发芽势高的种子发芽整齐迅速。发芽率是种子种用价值的最重要指标,发芽率高说明活种子比例大。发芽指数是综合反映种子生活力的重要指标。如表 1 所示,干旱胁迫对照 CK₁ 的桔梗种子发芽势、发芽率、发芽指数相对于正常浇水对照 CK₂ 均显著下降。同时,在单纯 SAP 处理下,桔梗种子的发芽势随着 SAP 施用浓度的升高而逐渐减小,且大多显著低于 CK₁;与单纯 SAP 处理相比,混施 Na 基膨润土处理种子发芽势均不同程度提高,但仅 SAP_{0.3} + Na₃ 和 SAP_{1.0} + Na₉ 处理达到显著水平,两者分别比 CK₁ 显著提高 30.73% 和 49.07%;混施 Ca 基膨润土处理发芽势也均比单纯 SAP 处理不同程度提高,且除 SAP_{0.3} + Ca₃ 外均达到显著水平,其中 SAP_{0.5} + Ca₆ 和 SAP_{1.0} + Ca₉ 处理的发芽势比 CK₁ 分别显著提高 35.75% 和 36.43%。

其次,经过不同 SAP、SAP + Na 和 SAP + Ca 保水处理后,干旱胁迫下的桔梗种子发芽率均比 CK₁ 不同程度提高,且除 SAP_{0.3} 外均达到显著水平。其中,单纯 SAP 处理发芽率随浓度升高呈先升后降的趋势,并以 SAP_{1.0} 和 SAP_{1.5} 显著较高,两者比 CK₁ 分别显著提高了 77.29% 和 79.81%;混施 Na 基膨润土和 Ca 基膨润土处理发芽率大多显著高于相应单纯 SAP 处理,并且与 SAP_{1.0} 和 SAP_{1.5}

相应的处理均显著较高, $SAP_{1.0} + Na_9$ 和 $SAP_{1.5} + Na_{12}$ 分别比 CK_1 显著提高了 99.97% 和 91.58%, $SAP_{1.0} + Ca_9$ 和 $SAP_{1.5} + Ca_{12}$ 则分别比 CK_1 显著提高了 96.62% 和 88.00%。另外,各保水处理发芽指数的表现与发芽率相似,除 $SAP_{0.3}$ 外均显著高于 CK_1 。其中,单纯 SAP 处理发芽指数以 $SAP_{0.5}$ 最高,显著高于其余 SAP 处理,比 CK_1 显著提高了 89.45%;混施 Na 基膨润土和 Ca 基膨润土处理发芽指数大多显著高于相应单纯 SAP 处理,并分别以 $SAP_{1.5} + Na_{12}$ 和 $SAP_{1.0} + Ca_9$ 最高,且显著高于其余的混施 Na 基和 Ca 基膨润土处理,两者发芽指数分别比 CK_1 显著提高 94.24% 和 114.24%。

表 1 不同保水处理对干旱胁迫下桔梗种子萌发的影响

Table 1 Effects of water conservation techniques on seed germination of *P. grandiflorum* under drought stress(n=4)

处理 Treatment	发芽势 Germination vigor/%	发芽率 Germination percentage/%	发芽指数 Vigor index
$SAP_{0.3}$	26.33±1.04de	38.50±2.29f	28.37±1.77h
$SAP_{0.5}$	19.5±0.50hij	62.83±2.25c	61.59±0.71b
$SAP_{1.0}$	21.83±0.29gh	70.33±3.01b	52.30±1.21d
$SAP_{1.5}$	16.50±1.50kl	71.33±2.08b	52.24±3.64d
$SAP_{2.0}$	15.17±1.76l	61.50±1.32c	43.28±0.54e
$SAP_{0.3} + Na_3$	30.50±1.32bc	53.83±2.57d	42.59±1.168ef
$SAP_{0.5} + Na_6$	21.50±1.80ghi	68.67±2.52b	54.91±1.749cd
$SAP_{1.0} + Na_9$	34.67±1.53a	79.33±1.53a	56.61±3.146c
$SAP_{1.5} + Na_{12}$	18.83±1.61ijk	76.00±2.00a	63.15±4.641b
$SAP_{2.0} + Na_{15}$	17.50±0.87jkl	59.67±2.08c	45.21±0.90e
$SAP_{0.3} + Ca_3$	28.17±2.02cd	45.67±2.52e	39.27±1.96f
$SAP_{0.5} + Ca_6$	31.67±2.47b	63.50±2.50c	51.39±0.71d
$SAP_{1.0} + Ca_9$	31.83±1.04b	78.00±1.00a	69.65±1.70a
$SAP_{1.5} + Ca_{12}$	24.67±2.08ef	71.50±2.29b	61.12±0.36b
$SAP_{2.0} + Ca_{15}$	20.33±2.52hi	62.33±2.25c	51.87±3.50d
CK_1	23.33±0.76fg	37.67±2.08f	32.51±1.07g
CK_2	27.50±1.32d	49.00±1.50e	39.42±0.65f

注:SAP、SAP+Na、SAP+Ca 分别表示保水剂、保水剂与 Na 基膨润土混施、保水剂与 Ca 基膨润土混施处理,下角数字为各处理试剂施用的克数; CK_1 、 CK_2 分别表示未使用任何试剂的耐旱性对照和正常浇水对照;同列数据后不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平。下同。

Note:SAP,SAP+Na and SAP+Ca represent treatments with super absorbent polymers,super absorbent polymers and Na bentonite,super absorbent polymers and Ca bentonite;The numbers in the lower corner represent the amount (gram) applied for each water conservation technique; CK_1 represent did not use any water conservation technique by drought stress; CK_2 represent normal watering control. Values followed by different letters within the same column mean significant difference between the treatments at the 5% level. The same as below.

以上结果说明,干旱胁迫条件下,桔梗种子的萌发受到显著抑制,适宜浓度的保水剂处理及其与 Na 基和 Ca 基膨润土混施处理能有效缓解这种抑制,种子发芽率甚至显著高于正常供水对照;单纯保水剂对桔梗种子萌发和活力有显著促进作用,但却显著抑制了发芽整齐度和速率,混施适宜剂量的 Na 基和 Ca 基膨润土能有效增强保水剂促进效应;总体而言,1.0 g 保水剂与 9 g Na 基膨润土或者 Ca 基膨润土混施对桔梗种子萌发的促进效应最佳。

2.2 不同保水方式对干旱胁迫下桔梗幼苗根茎长和叶片相对含水量的影响

根长是评价根系吸收功能最常用的参数,较长的根系可以使植物在干旱胁迫下吸收更多的水分。如表 2 所示,与 CK_2 相比,干旱胁迫(CK_1)下桔梗幼苗根长和茎长分别显著降低了 39.03% 和 16.49%。3 种保水方法均能通过改变土壤水分环境而改变植株的形态。单纯 SAP 处理的桔梗幼苗根长随着 SAP 施用浓度的升高先增加后减小,且均高于 CK_1 ,并在 $SAP_{1.0}$ 时达到最大,比 CK_1 显著增加 141.45%;而幼苗茎长则随着 SAP 浓度的增大呈现先减小后增大的趋势,并在 $SAP_{1.0}$ 处理时达到最低值,比 CK_1 显著降低了 15.23%;根茎长比例也在 $SAP_{1.0}$ 处理时最大(3.00),显著高于 CK_1 和其余处理。加入 Na 基膨润土有效促进了保水剂的效应,幼苗根长比相应单纯 SAP 处理均不同程度增加,而其茎长则不同程度降低,致使根茎比均显著增加。其中, $SAP_{1.0} + Na_9$ 的处理下根长最大,比 CK_1 显著增加了 180.76%;而 $SAP_{1.5} + Na_{12}$ 处理下茎长最小,则比 CK_1 显著降低了 27.36%;根茎长比例以 $SAP_{1.0} + Na_9$ 处理最大(3.86),显著高于对照和其余处理。在保水剂中加入 Ca 基膨润土后,幼苗根长和茎长在一些处理下显著高于相应的单纯 SAP 处理。其中,幼苗根长以 $SAP_{1.5} + Ca_{12}$ 处理效果最佳,比 CK_1 显著增加了 156.50%,此时根茎长比例也最大(2.54);幼苗茎长在 $SAP_{2.0} + Ca_{15}$ 处理时最大,显著比 CK_1 增加了 79.34%,此时根茎长比为 1.15。

相对含水量是植物水分状况的重要指标,可作为比较植物保水能力及推算需水程度的指标。如表 2 所示,除 $SAP_{2.0}$ 外,单纯保水剂处理均不同程度地提高了干旱胁迫下桔梗幼苗叶片相对含水量,在 $SAP_{1.0}$ 和 $SAP_{1.5}$ 处理下分别比 CK_1 显著提高了 16.62% 和 23.53%;保水剂加入 Na 基膨润土后,各个处理下的叶片相对含水量均比相应单纯SAP处

表 2 不同保水处理对干旱胁迫下桔梗幼苗生长的影响

Table 2 Effects of water conservation technique on seeding growth of *P. grandiflorum* under drought stress (n=20)

处理 Treatment	根长 Root length /mm	茎长 Shoot length /mm	根长/茎长 Root/shoot rate	叶片相对含水量 Leaf relative water content/%
SAP _{0.3}	19.67±0.30f	12.01±0.22cd	1.47±0.25gh	67.02±1.92ef
SAP _{0.5}	21.02±0.03e	12.46±1.69c	1.71±0.24fg	65.08±0.64fg
SAP _{1.0}	25.98±0.05c	8.74±0.93gh	3.00±0.31b	74.44±2.14d
SAP _{1.5}	15.84±0.15hi	11.21±1.05cde	1.46±0.07gh	78.85±1.24c
SAP _{2.0}	10.92±0.43j	15.10±0.96b	0.73±0.07j	60.56±2.59h
SAP _{0.3} +Na ₃	20.52±0.46ef	7.69±0.13hi	2.67±0.07bc	63.68±0.86gh
SAP _{0.5} +Na ₆	22.60±0.43d	8.85±0.91gh	2.58±0.31cd	74.48±0.89d
SAP _{1.0} +Na ₉	30.21±0.77a	7.86±0.59hi	3.86±0.24a	84.88±1.94ab
SAP _{1.5} +Na ₁₂	18.61±0.15g	7.02±0.88i	2.68±0.34bc	86.56±0.88a
SAP _{2.0} +Na ₁₅	20.79±0.50e	7.55±0.98hi	2.78±0.35bc	68.43±3.50e
SAP _{0.3} +Ca ₃	16.61±0.81h	9.59±0.35fg	1.73±0.12fg	64.82±2.46fg
SAP _{0.5} +Ca ₆	20.77±0.87e	10.86±0.40def	1.94±0.02ef	68.33±1.85e
SAP _{1.0} +Ca ₉	25.19±0.21c	11.24±0.80cde	2.25±0.17de	77.58±1.16c
SAP _{1.5} +Ca ₁₂	27.60±1.27b	10.69±0.34def	2.54±0.06cd	79.33±0.41c
SAP _{2.0} +Ca ₁₅	21.33±0.06e	18.49±0.46a	1.15±0.03hi	62.56±2.43gh
CK ₁	10.76±0.43j	10.31±0.27ef	1.04±0.06ij	63.83±1.22fg
CK ₂	14.96±0.62i	12.01±0.67cd	1.21±0.06hi	83.02±1.11b

理有所提高,并以 SAP_{1.0}+Na₉ 和 SAP_{1.5}+Na₁₂ 处理效果较好,分别比 CK₁ 显著增加了 32.98% 和 35.61%;保水剂中加入 Ca 基膨润土的效果则不如加入 Na 基膨润土的效果明显,在 SAP_{1.0}+Ca₉ 和 SAP_{1.5}+Ca₁₂ 处理中分别比 CK₁ 显著增加了 21.54% 和 24.28%。

以上结果说明,干旱胁迫显著抑制了桔梗幼苗生长,降低了桔梗叶片的相对含水量;适宜剂量保水剂中及混施适量加入膨润土可有效促进干旱胁迫下桔梗幼苗的地上地下部分协调性生长;1.0 g 保水剂与 9 g Na 基膨润土或者 1.5 g 保水剂与 12 g Na 基膨润土混施能有效促进桔梗幼苗在干旱环境下的根系生长,增强叶片的保水能力,为桔梗幼苗提供合适的生长环境。

2.3 不同保水方式对干旱胁迫下桔梗幼苗叶片抗旱生理指标的影响

2.3.1 丙二醛含量和相对电导率 MDA 是细胞内膜脂过氧化作用的最终产物之一,其含量高低可反映细胞膜受伤害的程度。如表 3 所示,桔梗幼苗在遭受干旱胁迫时,叶片 MDA 含量(CK₁)比正常浇水 CK₂ 显著增加了 22.59%;除 SAP_{2.0}+Na₁₅、SAP_{0.3}+Ca₃ 外,各 SAP、SAP+Na 和 SAP+Ca 保水处理均不同程度地降低了桔梗幼苗叶片内 MDA 含量,且 3 种保水处理下 MDA 含量均随剂量增加而呈现先降低后升高的趋势;其中,SAP₁、SAP_{0.5}+

Na₆ 和 SAP₁+Ca₉ 处理的桔梗幼苗叶片 MDA 含量在各类处理中均最低,分别比 CK₁ 显著降低了 50.97%、78.71%、123.89%。说明随着保水处理剂混施量的增加,其保水技术对干旱环境下桔梗幼苗叶片所受伤害的缓解效应降低,甚至造成新的伤害;从实验结果来看,1 g 保水剂与 9 g Ca 基膨润土混施效果最为明显。

同时,植物在受到逆境损伤的情况下细胞膜容易破裂,膜蛋白受伤害因而使胞质的胞液外渗而使相对电导率增大。表 3 显示,与正常浇水的 CK₂ 相比,CK₁ 相对电导率急剧上升了 34.63%,说明在干旱环境下叶片细胞膜受到伤害破裂。在单独施用不同浓度的 SAP 后,桔梗幼苗叶片的相对电导率均比 CK₁ 不同程度降低,并以 SAP_{1.0} 缓解效果最明显,叶片相对电导率显著降低了 34.87%;混合施用膨润土处理(SAP+Na、SAP+Ca)均能不同程度地降低叶片相对电导率,且缓解效果在一定程度上要好于单独施用保水剂处理,其中混施 Na 基膨润土以 SAP_{0.5}+Na₆ 和 SAP₁+Na₉ 处理效果较好,相对电导率比 CK₁ 分别显著降低了 52.00% 和 37.74%,混施 Ca 基膨润土则以 SAP₁+Ca₉ 处理效果最好,叶片的相对电导率比 CK₁ 显著降低了 45.43%。以上结果说明,适宜配比的 3 类保水处理均能有效减轻干旱胁迫对桔梗幼苗叶片细胞膜的破坏程度,起到了缓解干旱胁迫的作用,并以 1.5 g 保水剂与 12

g Na 基膨润土或者 1 g 保水剂与 9 g Ca 基膨润土混施处理的效果最为显著,此时的环境有利于桔梗幼苗的生长。

2.3.2 渗透调节物质含量 从表 3 可知,CK₁ 桔梗幼苗叶片的游离脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量相对正常浇水 CK₂ 处理急剧上升,分别显著增加 142.09%、64.88%和 49.84%。经过不同浓度保水剂 SAP 处理后,叶片游离脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量均随着 SAP 浓度的增加表现出先降低后升高的趋势,并均在 SAP_{1.0}时达到最低值,三者分别比 CK₁ 显著减少了 209.61%、96.84%和 75.24%。当保水剂中混入 Na 基与 Ca 基膨润土时,各处理幼苗叶片的可溶性蛋白含量无显著变化,而各处理叶片脯氨酸和可溶性糖含量或者显著升高,或者显著降低,或者无显著变化。其中,SAP_{1.5}+Na₁₂处理叶片脯氨酸和可溶性糖含量以及 SAP_{1.0}+Na₉处理可溶性蛋白含量在混施 Na 基膨润土处理中均最低,分别比 CK₁ 显著减少 228.96%、161.66%和 97.92%;而 SAP_{1.0}+Ca₉处理的游离脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量在混施 Ca 基膨润土处理中均最低,分别比 CK₁ 显著减少了 197.20%、104.70%和87.01%。以上结果说明适宜的 3 类保水处理下均能有效减少桔梗幼苗叶片的渗透调节物质,从而保证叶片组织水势的平衡使细胞膨压得以尽量维持,防止叶片组

织和细胞脱水。其中以 1.5 g 保水剂与 12 g Na 基膨润土或者 1 g 保水剂与 9 g Ca 基膨润土混施处理的效果最为显著,为桔梗生理代谢活动的正常进行提供良好的环境。

2.3.3 抗氧化酶活性 超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT) 为植物体内 2 种重要的抗氧化酶,对减少活性氧积累、减轻膜脂过氧化有重要作用,干旱胁迫则促进植物细胞自由基等活性氧的形成,钝化 SOD、CAT 等抗氧化酶。如表 4 所示,干旱胁迫显著降低了桔梗叶片 SOD 与 CAT 的活性,它们在 CK₁ 叶片中分别比 CK₂ 显著降低了34.66%和 58.74%。在干旱胁迫条件下,混施不同浓度的 SAP、SAP+Na 和 SAP+Ca 后,除 SAP_{0.3}+Ca₃ 外均能够不同程度地提高桔梗叶片 SOD 和 CAT 的活性,适宜浓度的 Na 基、Ca 基膨润土与 SAP 混施则要比单独保水剂处理效果好;SAP_{1.0}处理在单独施用保水剂处理中的效果最为显著,其 SOD 与 CAT 活性分别比 CK₁ 增加了 35.91%和 83.07%;SAP_{1.0}+Na₉和 SAP₁+Ca₉处理分别在 Na 基和 Ca 基膨润土混施处理中效果最好,其 SOD 和 CAT 的活性均达到了最大值,SAP_{1.0}+Na₉处理分别比 CK₁ 显著增加 65.88%和 118.10%,SAP₁+Ca₉处理则分别比 CK₁ 显著增加 57.66%和100.88%。以上结果说明混施适宜浓度的3种保水处理剂能使桔

表 3 不同保水处理对干旱胁迫下桔梗幼苗叶片内丙二醛含量、相对电导率以及渗透调节物质含量的影响

Table 3 Effects of water conservation technique on MDA content,relative conductivity and osmotic adjustment substance content in leaves of *P. grandiflorum* under drought stress (n=3)

处理 Treatment	丙二醛 Malondialdehyde /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	相对电导率 Relative conductivity/%	脯氨酸 Proline /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	可溶性多糖 Soluble polysaccharide/%	可溶性蛋白 Soluble protein /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
SAP _{0.3}	1.447±0.013cd	67.423±2.574ab	2.946±0.153ef	7.041±0.853a	4.676±0.357bc
SAP _{0.5}	1.566±0.092c	58.40±1.753cd	4.097±0.014cd	3.939±0.673cde	3.786±0.154de
SAP _{1.0}	1.179±0.090e	51.36±0.656f	1.581±0.158h	3.363±0.761def	3.098±0.165efg
SAP _{1.5}	1.356±0.088d	66.42±1.919ab	2.838±0.548ef	3.414±0.472def	3.693±0.121de
SAP _{2.0}	1.858±0.071b	68.76±1.333a	3.966±0.418cd	5.997±0.577b	4.854±0.133abc
SAP _{0.3} +Na ₃	1.322±0.049de	59.33±0.819c	5.060±0.559b	6.930±0.475a	5.235±0.017ab
SAP _{0.5} +Na ₆	0.996±0.095f	47.63±1.008g	3.672±0.849de	3.451±0.131def	3.383±0.132efg
SAP _{1.0} +Na ₉	1.554±0.106c	52.66±0.834f	1.748±0.117gh	3.024±0.264ef	2.743±0.236g
SAP _{1.5} +Na ₁₂	1.923±0.061b	56.20±1.679de	1.488±0.145h	2.530±0.100f	4.326±0.112cd
SAP _{2.0} +Na ₁₅	2.154±0.102a	64.37±2.759b	2.428±0.428fgh	7.196±0.212a	5.357±0.989ab
SAP _{0.3} +Ca ₃	2.094±0.106a	66.45±1.316ab	2.629±0.253fg	3.194±0.200def	4.961±0.141abc
SAP _{0.5} +Ca ₆	1.559±0.091c	59.37±0.401c	2.201±0.888fgh	4.397±0.186c	3.585±0.973ef
SAP _{1.0} +Ca ₉	0.795±0.185g	43.29±0.717h	1.647±0.378gh	3.234±0.118def	2.903±0.120fg
SAP _{1.5} +Ca ₁₂	1.183±0.126e	53.72±0.786ef	4.076±0.249cd	3.543±0.604cde	3.762±0.195de
SAP _{2.0} +Ca ₁₅	1.760±0.037b	68.94±1.092a	6.152±0.875a	6.910±0.943a	4.776±0.233abc
CK ₁	1.780±0.064b	69.27±0.910a	4.895±0.853bc	6.620±0.237ab	5.429±0.149a
CK ₂	1.452±0.091cd	51.45±0.820f	2.022±0.665fgh	4.015±0.161cd	3.623±0.488def

梗幼苗在干旱条件下保护酶活性可维持在较高的水平,其中以 1 g 保水剂与 9 g Na 基膨润土或者 1 g 保水剂与 9 g Ca 基膨润土混施更有利于桔梗幼苗叶片清除自由基降低膜脂过氧化水平,保护桔梗幼苗受到伤害。

2.3.4 抗氧化物质含量 抗坏血酸 ASA 和谷胱甘肽 GSH 参与的信号转导途径在恢复体内氧化还原势稳态平衡、减轻逆境下对植物的伤害及自身在体内的累积具有重要作用。如表 4 所示,在干旱胁迫条件下,桔梗幼苗叶片中的 ASA 和 GSH 含量较正常浇水 CK₂ 都有所降低,CK₁ 分别比 CK₂ 显著降低了 159.76% 和 23.96%。在混施不同浓度的 SAP、SAP+Na 和 SAP+Ca 后,各处理 ASA 和 GSH 含量相对于 CK₁ 均有所升高,且一定浓度的保水剂与 Na 基膨润土混施要比单独施用保水剂效果好。其中,单独施用保水剂处理以 SAP_{1.0} 效果最为显著,其叶片 ASA 和 GSH 的含量分别比 CK₁ 显著增加了 136.17% 和 27.79%;混施 Na 基膨润土处理以 SAP_{1.0}+Na₉ 和 SAP_{0.5}+Na₆ 效果较明显,SAP_{1.0}+Na₉ 处理的 AsA 的含量要比 CK₁ 显著增加了 153.38%,SAP_{0.5}+Na₆ 处理的 GSH 含量比 CK₁ 显著增加了 31.53%;混施 Ca 基膨润土处理则以 SAP_{1.0}+Ca₉ 和 SAP_{1.5}+Ca₁₂ 处理效果最为明显,SAP_{1.0}+Ca₉ 处理的 AsA 含量比 CK₁ 显著提高

149.32%,而 SAP_{1.5}+Ca₁₂ 处理的 GSH 含量比 CK₁ 显著增加了 29.77%。以上结果说明,混施适宜浓度的 3 种保水处理剂能显著增加干旱胁迫下桔梗幼苗叶片抗氧化物质含量,有效缓解受到的干旱伤害,并以 1 g 保水剂与 9 g Na 基膨润土或者 1 g 保水剂与 9 g Ca 基膨润土混施的效果更佳。

2.4 不同保水方式对桔梗幼苗叶片光合色素含量的影响

如表 5 所示,与正常浇水 CK₂ 处理比较,干旱胁迫处理 CK₁ 桔梗幼苗叶片叶绿素(Chl)和类胡萝卜素含量分别显著下降 77.05% 和 50.64%;不同浓度 SAP、SAP+Na 和 SAP+Ca 处理对桔梗叶片光合色素含量均有显著影响;而叶片 Chla/Chl b 值各处理下均无显著变化。其中,单独施用 SAP 条件下,除 SAP_{0.3} 和 SAP_{2.0} 处理外均能显著提高幼苗的光合色素含量,并以 SAP_{1.0} 处理的叶绿素含量最高,比 CK₁ 显著增加了 68.49%,而以 SAP_{0.5} 处理的类胡萝卜素最高,比 CK₁ 显著增加了 50.65%;在保水剂中加入 Na 基膨润土后,桔梗幼苗光合色素含量除 SAP_{0.3}+Ca₃ 外都比单独 SAP 处理有不同程度的增加,如叶绿素含量最高的 SAP_{1.5}+Na₁₂ 处理比 CK₁ 显著增加了 86.56%,类胡萝卜素含量最高的 SAP_{1.0}+Na₉ 处理比 CK₁ 显著增加了 88.31%;保水剂中加入 Ca 基膨润土后,仅 SAP_{1.0}+Ca₉ 处理的

表 4 不同保水处理对干旱胁迫下桔梗幼苗叶片内 SOD、CAT 活性和 ASA、GSH 含量影响

Table 4 Effects of water conservation technique on SOD,CAT activities and ASA, GSH contents in leaves of *P. grandiflorum* under drought stress (n=3)

处理 Treatment	SOD 活性 SOD activity /(U · g ⁻¹ · min ⁻¹)	CAT 活性 CAT activity /(mg · g ⁻¹ · min ⁻¹)	ASA 含量 ASA content /(μmol · g ⁻¹)	GSH 含量 GSH content /(μmol · g ⁻¹)
SAP _{0.3}	134.340±8.606h	41.760±1.070i	1.771±0.105h	1.445±0.046def
SAP _{0.5}	180.199±4.645de	52.949±2.716fg	2.066±0.056fg	1.506±0.013bcde
SAP _{1.0}	186.388±10.249cd	65.157±1.024c	2.442±0.071bc	1.605±0.021ab
SAP _{1.5}	173.760±10.269ef	58.298±0.967de	2.247±0.055de	1.565±0.031abc
SAP _{2.0}	148.192±2.404g	45.751±1.732h	1.321±0.077i	1.469±0.012cdef
SAP _{0.3} +Na ₃	176.436±3.033de	56.133±1.102ef	1.283±0.041i	1.403±0.066ef
SAP _{0.5} +Na ₆	195.614±4.291c	65.511±3.220c	2.123±0.118ef	1.652±0.11a
SAP _{1.0} +Na ₉	227.482±5.808a	77.627±1.456a	2.620±0.027a	1.509±0.076bcde
SAP _{1.5} +Na ₁₂	188.363±5.231cd	59.915±0.634de	2.345±0.030cd	1.487±0.059cdef
SAP _{2.0} +Na ₁₅	143.489±6.209gh	52.798±2.770fg	1.943±0.058g	1.406±0.016ef
SAP _{0.3} +Ca ₃	178.304±3.755de	33.818±4.208j	2.093±0.047fg	1.497±0.089bcde
SAP _{0.5} +Ca ₆	182.859±8.488de	52.191±0.683g	2.379±0.106cd	1.372±0.053f
SAP _{1.0} +Ca ₉	216.208±3.347b	71.499±2.618b	2.578±0.008ab	1.438±0.059def
SAP _{1.5} +Ca ₁₂	210.262±6.745b	60.978±1.944d	2.289±0.175cd	1.630±0.050a
SAP _{2.0} +Ca ₁₅	164.425±8.129f	50.060±3.103g	2.088±0.032fg	1.410±0.073ef
CK ₁	137.134±6.521gh	35.592±1.438j	1.034±0.085j	1.256±0.115g
CK ₂	184.661±7.037cde	56.500±1.040ef	2.686±0.153a	1.557±0.024abcd

表 5 不同保水处理对桔梗幼苗叶片内光合色素含量的影响
Table 5 Effects of water conservation technique on the contents of photosynthetic pigment in leaves under drought stress (n=3)

处理 Treatment	叶绿素 Chlorophyll				类胡萝卜素 Carotenoid /(mg·g ⁻¹)
	叶绿素 a Chlorophyll a /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chlorophyll b /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b Chl a/Chl b	总叶绿素 Chl /(mg·g ⁻¹)	
SAP _{0.3}	0.670±0.002ghi	0.261±0.006def	2.578	0.938±0.012ghi	0.153±0.010gh
SAP _{0.5}	0.849±0.096de	0.333±0.012c	2.722	1.234±0.034de	0.232±0.005bc
SAP _{1.0}	1.009±0.006bc	0.389±0.014ab	2.644	1.417±0.047bc	0.170±0.008fg
SAP _{1.5}	0.912±0.051cd	0.344±0.016c	2.710	1.243±0.063de	0.182±0.008ef
SAP _{2.0}	0.556±0.130i	0.216±0.049g	2.702	0.778±0.178j	0.155±0.012gh
SAP _{0.3} +Na ₃	0.660±0.078ghi	0.239±0.027efg	2.815	0.874±0.109hij	0.187±0.024ef
SAP _{0.5} +Na ₆	0.772±0.054efg	0.274±0.008de	2.784	1.038±0.059fg	0.224±0.011cd
SAP _{1.0} +Na ₉	0.958±0.036cd	0.331±0.007c	2.857	1.282±0.023cd	0.290±0.019a
SAP _{1.5} +Na ₁₂	1.144±0.011a	0.418±0.010a	2.711	1.569±0.007a	0.252±0.010b
SAP _{2.0} +Na ₁₅	0.800±0.033ef	0.270±0.031def	2.779	1.114±0.089ef	0.198±0.003e
SAP _{0.3} +Ca ₃	0.603±0.021i	0.238±0.042efg	2.763	0.828±0.040ij	0.143±0.021h
SAP _{0.5} +Ca ₆	0.745±0.095efg	0.258±0.025def	2.828	0.989±0.115fgh	0.149±0.009gh
SAP _{1.0} +Ca ₉	0.947±0.037cd	0.353±0.012bc	2.649	1.305±0.053cd	0.247±0.005b
SAP _{1.5} +Ca ₁₂	0.731±0.058fgh	0.286±0.014d	2.591	1.030±0.069fg	0.204±0.014de
SAP _{2.0} +Ca ₁₅	0.586±0.093i	0.228±0.035fg	2.650	0.846±0.125ij	0.145±0.016h
CK ₁	0.624±0.029hi	0.213±0.012g	2.921	0.841±0.042ij	0.154±0.007gh
CK ₂	1.077±0.028ab	0.402±0.009a	2.652	1.489±0.031ab	0.232±0.014bc

类胡萝卜素含量显著高于相应的单独 SAP 处理,其叶绿素含量和类胡萝卜素含量分别比 CK₁ 显著增加了 55.17%和 60.39%。总体而言,桔梗幼苗光合色素含量在干旱胁迫下受到抑制,适宜浓度的 3 种保水处理均能增加干旱胁迫下桔梗叶片中叶绿素的含量,但是随着混施浓度的增加则会对桔梗叶绿素含量产生抑制作用,其中 1 g 保水剂与 9 g Na 基膨润土、1.5 g 保水剂与 12 g Na 基膨润土或者 1 g 保水剂与 9 g Ca 基膨润土混施效果最为明显。

3 讨 论

桔梗是一种较耐干旱的中生植物,但由于其种子较小、播种浅,其种子萌发及保苗成为栽培过程中急需解决的问题。本研究表明,CK₁ 和 CK₂ 处理的桔梗种子比混施 3 种保水方式的处理先萌发,说明在水分供应量相同的情况下,种子萌发吸涨过程需要吸收大量水分,保水剂吸水能力强,形成了保水剂与桔梗种子争水现象;随着混施 SAP 浓度的升高,争水问题越发严重,导致种子发芽势逐渐降低,减缓了种子萌发速率,这与 Mikkelsen^[17] 和吕彪^[18] 的研究结果一致。马斌等^[19] 在研究不同膨润土施用量对旱作农田土壤保水能力和燕麦产量影响中发现,利用膨润土自身特点均可不同程度地改善土壤性

状,本试验在 SAP 中混入 Na 基膨润土与 Ca 基膨润土之后可显著缓解保水剂与桔梗种子争水现象,提高种子发芽率,这可能与膨润土具有良好的分散性、粘结性、吸附性、离子交换等性能有关^[20]。在胁迫条件下,植物在逆境胁迫下提高自身渗透调节物质含量水平,对维持体内水分平衡具有重要意义。本研究表明,与正常浇水的 CK₂ 桔梗幼苗叶片相比较,CK₁ 的可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸、丙二醛含量以及相对电导率都显著提高,说明桔梗幼苗可通过积累渗透调节物质来缓解干旱胁迫造成的伤害;同时,桔梗幼苗叶片 SOD、CAT 的活性以及 AsA 和 GSH 的含量都有所下降,这可能是由于长时间干旱胁迫下细胞膜代谢系统和信号传递系统发生紊乱,诱发过氧化胁迫,对细胞生理代谢造成障碍,因而使叶绿素含量降低,桔梗抵抗干旱胁迫的能力也随之下降,这与王姗等^[21] 关于干旱胁迫对桔梗幼苗生理特性影响的研究结果一致。在混施一定浓度的 SAP、SAP+Na 和 SAP+Ca 后,本实验中桔梗幼苗以上各项指标都与 CK₁ 具有显著性的差异,可能由于基质的水分状况得到了缓解,桔梗幼苗叶片中各逆境生理指标含量趋于正常浇水的 CK₂ 水平,从而说明施用适宜浓度的 3 种保水处理剂后为桔梗幼苗提供了正常生长所需水分,对由于干旱胁

迫所造成的桔梗幼苗叶片膜系统的伤害起到有效的缓解作用,避免桔梗幼苗遭受氧化胁迫。

作为感受土壤水分变化的原初部位,根系的状况直接影响作物抗旱性的强弱。相关研究表明,桔梗幼苗根系生长比茎秆生长更具耐旱性^[22]。在本实验研究过程中发现,不同处理下桔梗幼苗根系长有着显著的差异性,这与杨永辉^[23]的研究结果一致。同时,随着3种保水方式中SAP浓度的增大,根系生长速率先增加后降低,这可能一方面是因为保水剂吸收了大量的水,且浓度越高吸收越多,因而无法及时供给水分给根系生长;另一方面可能跟土壤的紧实度有关,即在紧实土壤中根系生长速度减慢,根系变短^[24]。张向东等^[25]通过研究发现土壤紧实程度对桔梗的生长和产量有一定的影响,在本次试验中采用的是沙粒,沙粒紧实度在浇水后明显增大,这样就对桔梗幼苗根系生长发育产生抑制作用,而在沙粒中均匀混入SAP后,由于SAP吸水后体积变大,沙粒间的空隙也明显变大,给幼苗根系充分伸长生长提供了有利的环境。同时,本实验结果表明,在保水剂中加入一定浓度的膨润土之后,桔梗幼苗叶片含水量也比单纯施用保水剂时高,这同样说明加入适宜的膨润土有助于解决桔梗幼苗与SAP在供水一致的情况下产生争水的问题。不同器官之间生物量分配与植物对干旱适应能力密切相关,在不同保水处理剂处理下,相对于正常浇水的CK₂来说,地上部分生长都明显受到了抑制,这可能因为在苗期为了给桔梗幼苗创造良好营养生长条件,要促进根系生长,而减缓地上部分生长,这与李芳兰^[26]在研究白刺花时得到的结果相一致。保水剂中混入Na基膨润土时在SAP_{1.0}+Na₉时根茎长比例达到

最大值,说明此时的环境能更好地刺激桔梗幼苗进行营养生长,增强桔梗幼苗的耐旱性能。据此,土壤中同时混入适宜的保水剂与膨润土,不但可以改善在多雨季节造成的土壤紧实状况,而且可改善在干旱时土壤的松散状况;保水剂在提高土壤的持水能力,增加土壤有效水含量方面发挥着重要作用^[27],膨润土则有利于土壤中有机的积累和转化,提高土壤的阳离子交换量和盐基饱和度,增加土壤的保肥性能^[28],两者配合可共同促进桔梗种子萌发和幼苗的生长。

综上所述,在干旱胁迫下,桔梗种子萌发遭到了抑制,桔梗幼苗能够调解自身生理机制来抵抗干旱所带的胁迫,通过增加细胞渗透调节物质的含量来增强其对干旱胁迫的适应能力。在混施一定浓度的SAP、SAP+Na和SAP+Ca后,能够改善土壤结构,促进桔梗种子萌发,增强桔梗幼苗根系的适应能力,为幼苗提供生长所需水分,保护桔梗幼苗正常生长发育,保水剂和膨润土结合混施更能起到一收一放的作用,且比单纯施用保水剂效果更加显著。总体上以SAP_{1.0}、SAP_{1.0}+Na₉、SAP_{1.5}+Na₁₂以及SAP₁+Ca₉处理效果最好,且保水技术对促进桔梗种子萌发及幼苗抗旱性的能力表现为:SAP_{1.5}+Na₁₂>SAP_{1.0}+Na₉>SAP_{1.0}+Ca₉>SAP_{1.0}。在今后的生产实践中,小种子播种可用适宜浓度的保水剂和膨润土“拌种”,并可着手研究开发桔梗专用的保水种衣剂。由于目前关于保水剂和膨润土的混合施用的有关研究报道甚少,因而保水剂与膨润土之间具体的主导关系及两者在土壤中的作用机理尚有待深入研究。

参考文献:

- [1] SHI F G(石福高), WANG W L(王渭玲). Research on the water absorbing character and germination conditions of *Platycodon grandiflorum* seed[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2011, **20**(4): 87—90(in Chinese).
- [2] LIU Z G(刘自刚), SHEN B(沈冰), ZHANG Y(张雁). Morphological responses to temperature, drought stress and their interaction during seed germination of *Platycodon grandiflorum*[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(8): 2 615—2 622(in Chinese).
- [3] HUANG ZH(黄震), HUANG ZH B(黄占斌), LI W Y(李文颖), et al. Effect of different super absorbent polymers on soil moisture and soil nitrogen holding capacity[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2010, **18**(2): 245—249(in Chinese).
- [4] PAUL W, TIM K. Solids, organic load and nutrient concentration reductions in swine waste slurry using a polyacrylamide (PAM) aided solids flocculation treatment[J]. *Water Research*, 2005, **90**(2): 151—158.
- [5] LIU D H(刘殿红), HUANG ZH B(黄占斌), CAI L J(蔡连捷), et al. Effect of different applying on ways and amounts of aquasorbent-yield and benefit of potato[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2008, **17**(1): 266—270(in Chinese).
- [6] BELANGER G, WALSH J R, RICHARDS J E, et al. Tuber growth and biomass partitioning of two potato cultivars grown under different N fertilization rates with and without irrigation[J]. *American Journal of Potato Research*, 2001, **78**(2): 109—117.

- [7] HAN H Q(韩红青),ZHU Y(朱 岳). Study on modification and application of bentonite[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2011, **43**(10):5—8.
- [8] CHENG X D(成信东),LIN ZH H(林忠海),WEI X L(魏晓丽). The application of bentonite in the agriculture and avocation[J]. *Shanxi Architecture*(山西建筑), 2007, **33**(9):123—124(in Chinese).
- [9] LIU X ZH(刘秀珍),ZHANG J ZH(张敬忠). The resources, characters and agricultural applications of bentonite in Shanxi[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University*(山西农业大学学报), 2003, **26**(3):283—285,294(in Chinese).
- [10] YANG CH M(杨成民),ZHANG ZH(张 争),WEI J H(魏建和),*et al.* The research of *Platycodon grandiflorum* seed quality classification standard[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*(中药材), 2012, **35**(5):679—682(in Chinese).
- [11] GUO Q SH(郭巧生),ZHAO R H(赵荣海),DONG Q T(董其亭),*et al.* The impact of different storage methods on vitality of *Platycodon grandiflorum* seed[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*(中国中药杂志), 2007, **32**(14):1 465—1 467(in Chinese).
- [12] CHEN J(陈 娟),LEI J(雷 霁),WANG L(王 磊),*et al.* Effects of four chemicals reagents soak on seeds germination and seedling growth of *Platycodon grandiflorum*[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*(西北农业学报), 2010, **19**(4):100—105(in Chinese).
- [13] ZHANG L(张 丽),ZHU L H(祝利海). Effects of water-holding agent on germination and vigor of wheat and corn seeds[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*(安徽农业科学), 2002, **30**(6):921—922(in Chinese).
- [14] PAN J F(潘嘉芬),LU J(卢 杰). Experimental study on adsorption of Pb^{2+} , Ni^{2+} and Cd^{2+} from waste water by natural and modified bentonites[J]. *Metalmine*(中国矿业), 2008, (9):130—133(in Chinese).
- [15] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [16] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2002.
- [17] MIKKELSEN R L. Using hydrophilic polymers to control nutrient release[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1994, **38**:53—59.
- [18] LÜ B(吕 彪),WANG ZH J(王治江),JIN X A(靳晓爱),*et al.* Effects of different type water retention agents on maize germination and resistant to drought[J]. *Modern Agricultural Sciences*(现代农业科学), 2009, **16**(13):51—53(in Chinese).
- [19] MA B(马 斌),LIU J H(刘景辉),YANG Y M(杨彦明),*et al.* Effect of different bentonite on soil capacity of water-holding and Oats yield in rainfed field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*(西北农业学报), 2015, **24**(8):42—49(in Chinese).
- [20] PENG Y W(彭杨伟),SUN Y(孙 燕). Resources characteristics and market situation of bentonites at home and Abroad[J]. *Metal Mine*(金属矿山), 2012, 4:95—105(in Chinese).
- [21] WANG SH(王 姗),WANG ZH CH(王竹承). Effect of drought stress on growth and physiological characteristics of *Platycodon grandiflorum* seedling[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*(西北农业学报), 2014, **23**(7):160—165(in Chinese).
- [22] FRENSCH J, HSIAO T C. Transient responses of cell turgor and growth of maize roots as affected by changes in water potential[J]. *Plant Physiology*, 1994, **104**(1):104—247.
- [23] YANG Y H(杨永辉),WU J CH(武继承),WU P T(吴普特),*et al.* Effects of different application rates of water-retaining agent on root physiological characteristics of winter wheat at its different growth stages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2011, **22**(1):73—78(in Chinese).
- [24] SHANG Q W(尚庆文),KONG X B(孔祥波),WANG Y X(王玉霞),*et al.* Effects of soil compactness on ginger plant senescence[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2008, **19**(4):782—786(in Chinese).
- [25] ZHANG X D(张向东),DENG H SH(邓寒霜),HUA ZH R(华智锐). Effects of soil compaction stress on growth, quantity and quality of *Platycodon grandiflorum*[J]. *Journal of Northwest A&F University*(Nat. Sci. Edi.)(西北农林科技大学学报·自然科学版), 2013, **41**(7):177—182(in Chinese).
- [26] LI F L(李芳兰),BAO W K(包维楷),WU N(吴 宁). Morphological and physiological responses of current *Sophora davidii* seedlings to drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2009, **29**(10):5 406—5 416(in Chinese).
- [27] WU J CH(武继承),GUAN X J(管秀娟),YANG Y H(杨永辉). Effects of ground cover and water-retaining agent on winter wheat growth and precipitation utilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2011, **22**(1):86—92(in Chinese).
- [28] LI J J(李吉进),ZOU G Y(邹国元),WANG M J(王美菊),*et al.* Study on the effect of bentonite improving soil fertilizer-conserving and increasing yields[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*(中国土壤与肥料), 2006, (3):27—30(in Chinese).

(编辑:裴阿卫)