

保水剂对高羊茅种子萌发及幼苗生理的影响

杨杰¹, 曹昀^{1,2}, 王秀文¹, 黄佳超¹, 李生¹

(1. 江西师范大学 地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 江西师范大学 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘 要:采用盆栽试验,研究了足量供水与限量供水条件下保水剂浓度(0.00%, 0.10%, 0.20%, 0.30%, 0.40%)对高羊茅(*Festuca arundinacea*)种子萌发及幼苗生理的影响,利用隶属函数分析法综合评价了不同保水剂浓度下高羊茅抗旱能力。结果表明:(1)保水剂可提高高羊茅种子萌发率与发芽势,足量供水条件最优保水剂浓度为 0.10%,发芽率和发芽势与 CK 相比分别提升 4.97% 和 6.05%,限量供水条件最优保水剂浓度为 0.40%,发芽率和发芽势与 CK 相比分别提升 38.13% 和 45.91%;(2)保水剂可提高高羊茅幼苗叶片的叶绿素 a, b 及类胡萝卜素含量,降低幼苗叶片 SOD, POD, MDA 的含量,保水剂浓度为 0.20%~0.40% 处理时各组值变化幅度较小;(3)保水剂可提高高羊茅根系活力,在保水剂浓度为 0.20% 处理时达到最大值;(4)通过隶属函数综合分析,5 种保水剂浓度下高羊茅抗旱性顺序在足量供水条件下为 0.20% > 0.30% > 0.10% > 0.40% > 0.00%, 限量供水条件下为 0.30% > 0.40% > 0.10% > 0.20% > 0.00%。建议在不同地区的高羊茅绿地建植与养护节水中加入浓度为 0.20%~0.30% 的保水剂,以利于草坪建植和延长草坪灌溉时间。

关键词:保水剂; 高羊茅; 萌发率; 生理特性; 抗旱性

中图分类号:Q945.79; S723.1; S359.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0351-06

Effect of Super Absorbent Polymer on Germination and Physiological Characteristics of *Festuca arundinacea*

YANG Jie¹, CAO Yun^{1,2}, WANG Xiuwen¹, HUANG Jiachao¹, LI Sheng¹

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: We conducted a study of the effect of super absorbent polymer (SAP) on the seed germination and physiological characteristics of *Festuca arundinacea*. Two different water and five aquasorb treatments were investigated based on a pot experiment. Comprehensive evaluation combining with 9 indicators subordinate function showed the *Festuca arundinacea* drought resistance ability. The results showed that: (1) SAP may effectively enhance the germination percentage and germinating potential of *Festuca arundinacea*. Compared with the control, the optimum SAP of sufficient amount of water conditions is 0.10%, they were improved by 4.97% and 6.05%, the condition of limited water supply was 0.40%, they were improved by 38.13% and 45.91%; (2) SAP may effectively enhance the chlorophyll content and decreased SOD, POD, MDA contents of the seedling leaves of *Festuca arundinacea*, the physiological index showed that change range was smaller when the concentrations of SAP ranged from 0.20% to 0.40%; (3) the application of SAP could improved the root vitality; (4) through the subordinate function analysis, under sufficient amount of water conditions, drought resistance of the five kinds of concentrations of SAP decreased in the order: 0.20% > 0.30% > 0.10% > 0.40% > 0.00%, on the contrary, the consequence was 0.30% > 0.40% > 0.10% > 0.20% > 0.00%. Therefore, applying 0.20% or 0.30% of SAP can increase the *Festuca arundinacea* seed germination of subordinate function, and it can be used in planting, maintenance and water-saving of urban green space.

Keywords: super absorbent polymer; *Festuca arundinacea*; germination percentage; physiological characteristics; drought resistance

高羊茅(*Festuca arundinacea*)为羊茅属多年生草本植物^[1],作为优良的冷季型草坪草,已被广泛应用于植被护坡、园林绿化、水土保持等诸多领域^[2],是目前我国应用最广泛的冷季型草坪草之一^[3]。但由于分布区不同土壤水分条件的影响,使高羊茅草坪种子萌发与幼苗生长不理想,常常建植失败^[4]。而保水剂是一种高分子化合物,可以吸持自身重量数百倍的水分^[5]。大量的研究表明,使用保水剂可减少土壤水分养分流失、增强土壤保水性^[6]、改善土壤结构^[7]、提高植物出苗率和抗旱性^[7]、促进植物地上部分和根系的发育^[8-10]。近年来,已有保水剂对高羊茅水分利用效果^[11-12]、种子萌发^[13-15]及不同基质中添加保水剂对高羊茅生长的影响研究^[2,16],但针对保水剂对高羊茅生理影响的研究较少。因此,本文对比研究足量供水与限量供水条件下,不同保水剂浓度对高羊茅幼苗生理的影响,以期探明保水剂的合理用量,为保水剂在高羊茅绿地建植上的推广应用提供参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验设计

本试验采用绿地建植中常见的高羊茅种子(千粒重 2.4 g)为试验材料,保水剂为河南神润生物科技有限公司生产(保水性 300~500 倍)。试验在鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室植物阳光培养室内进行,试验持续 60 d。试验基质将土、沙、草木灰自然状态下风干后过筛,按 1:1:1 的体积比混合后装于长 35 cm、宽 26 cm、高 13 cm 的试验盆内,每盆基质重(8±0.5) kg。保水剂浓度按 0.00%,0.10%,0.20%,0.30%,0.40%与试验基质按质量比混合搅匀,其中 0.00%处理试验中记为 CK 组。播种前种子放于盛有蒸馏水的烧杯内浸种 5 h,播种时每盆分播 100 粒,覆土 1 cm。水分处理分为足量供水组和限量供水组,足量供水组,每 4 d 浇水 1 次,水量 150 ml;限量供水组,每 20 d 浇水 1 次,水量 150 ml,试验中每组处理 3 次重复,定时采用 HH2 型土壤水分仪测定足量供水组与限量供水组土壤水分含量,试验期两组处理平均土壤水分含量为 31.3%和 12.4%。

1.2 指标测定

(1) 种子发芽率、发芽势的测定。种子萌发以播种当天为第 1 天,以后每天统计发芽数,计算最终萌发率,试验持续至各组不再出现新的种子萌发作为萌发试验终止时间。计算公式如下:

$$\text{发芽率} = (\text{发芽种子数} / \text{种子总数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽势} = (\text{高峰时正常发芽种子数} / \text{种子总数}) \times 100\%$$

(2) 高羊茅幼苗生物量的测定。试验结束后,从

盆内轻取幼苗,用蒸馏水将幼苗植株与根部洗净吸干,放于烘箱内 80℃恒温烘干至恒重,采用电子分析天平 BS214D 称重,求平均值为其生物量。

(3) 幼苗生理指标的测定。盆栽试验于播种后 60 d 结束,采集新鲜植物叶片与根系测定幼苗生理指标。参照王学奎^[17]的方法分别采用 95%乙醇提取分光光度法测定叶绿素;高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶(CAT);氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD);愈创木酚法测定过氧化物酶(POD);硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)及氯化三苯基四氮唑法测定根系活力。

1.3 数据处理

数据分析采用 Microsoft Excel 2010,SPSS 21.0 辅助完成。

1.4 耐旱性综合评定

隶属函数的计算方法^[18]:

$$\text{隶属函数值: } R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

$$\text{反隶属函数值: } R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中: X_i 为指标测定值; X_{\min} , X_{\max} 为所有参试材料某一指标的最小值和最大值。

2 结果与分析

2.1 不同保水剂浓度对高羊茅种子萌发率与发芽势的影响

在不同水分条件下保水剂对高羊茅种子发芽率和发芽势的影响存在差异。随保水剂浓度的增加高羊茅种子的发芽率和发芽势,在限量供水条件下呈上升趋势,分别比对照增加 33.47%,33.90%,36.93%,38.13%和 41.23%,39.74%,46.21%,45.91%,在 0.40%浓度下种子发芽率与发芽势达到最大分别为 38.13%和 45.91%,差异显著 $p < 0.05$;在足量供水条件下表现为先上升后下降的趋势,仅在保水剂浓度为 0.10%时高羊茅种子发芽率与发芽势高于 CK 组,分别高 4.97%和 6.05%(表 1)。可见,在不同水分条件下适当施加保水剂对高羊茅种子萌发有促进作用。

2.2 不同保水剂浓度对高羊茅幼苗生物量的影响

综合考虑在不同水分条件下的土壤中,添加浓度为 0.20%~0.30%的保水剂利于提高高羊茅幼苗生物量。足量供水条件下,除保水剂浓度为 0.10%时幼苗生物量低于 CK 组外,其余各组处理均显著高于 CK 组,并在 0.40%处理下达到最大值,较 CK 组增加 38.47%。限量供水条件下,表现出在保水剂浓度为 0.40%时幼苗生物量低于 CK 组,其余各组处理均均大于 CK 组,在 0.10%处理下达到最大值,较 CK 组增加 46.02%(图 1)。

表 1 保水剂对高羊茅种子萌发的影响 %

保水剂浓度	发芽率		发芽势	
	足量供水	限量供水	足量供水	限量供水
CK	91.7±2.78c	61.8±0.34a	88.5±3.60a	50.2±5.64a
0.10%	96.5±2.28c	92.9±0.79b	94.2±3.24a	85.4±4.32b
0.20%	91.3±3.09bc	93.5±0.89b	88.0±4.25a	83.3±3.32b
0.30%	82.5±4.54ab	98.0±3.35c	77.3±5.91a	93.0±4.35b
0.40%	77.9±3.76a	99.9±0.05c	73.5±4.77a	92.8±4.18b

注:同列中不同字母表示差异显著($p<0.05$),下表同。

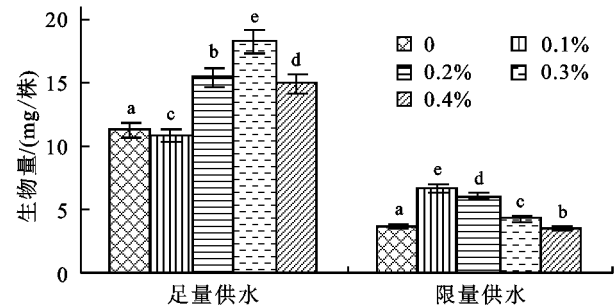


图 1 保水剂浓度下高羊茅生物量的变化

2.3 不同保水剂浓度对高羊茅叶片叶绿素含量的影响

在足量供水和限量供水条件下,施加保水剂的高羊茅幼苗叶片叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、叶绿素 a+b(Chl a+b)、类胡萝卜素(Car)的含量均要高于未施加保水剂的处理(表 2)。其中,足量供水条件下,随保水剂浓度的增加,上述 4 种指标均呈现逐渐增加

的趋势,最大值出现在保水剂浓度为 0.40%处理,分别比 CK 组增加 34.30%,32.05%,32.30%,33.13%。

在限量供水条件下,高羊茅叶片叶绿素 a、叶绿素 a+b、类胡萝卜素含量随保水剂浓度的增加表现为先增加后下降趋势,分别在保水剂浓度为 0.20%,0.20%,0.10%处达到最大值,与 CK 组相比依次增加 22.2%,23.0%,19.8%,不同处理下各项指标与对照相比差异显著。叶绿素 a/b 表示植物体捕光色素蛋白复合物的含量,当叶绿素 a/b 含量增高时植物蛋白复合物的含量会随之下降^[19],不同水分条件下叶绿素 a/b 变化幅度较小,随保水剂浓度增加均呈现先增加后下降趋势,足量供水为 2.63~2.82 mg/g,最大值在 0.20%,限量供水为 2.65~3.10 mg/g,最大值在 0.10%。

表 2 保水剂对高羊茅叶片叶绿素含量影响 mg/g

处理	足量供水					限量供水				
	Chl a	Chl b	Chl a+b	Car	Chl a/b	Chl a	Chl b	Chl a+b	Car	Chl a/b
CK	0.689a	0.250a	0.939a	0.142a	2.759a	1.124a	0.408a	1.532a	0.223a	2.753e
0.10%	0.915b	1.329d	1.243b	0.182a	2.783a	1.280b	0.414b	1.695b	0.278e	3.090d
0.20%	0.890b	0.315b	1.205b	0.183a	2.827a	1.446c	0.543e	1.990e	0.248b	2.661b
0.30%	0.861a	0.327b	1.189a	0.186b	2.632b	1.402e	0.518c	1.921c	0.242b	2.705c
0.40%	1.019b	0.367c	1.386b	0.210a	2.773a	1.444d	0.544d	1.989d	0.243c	2.653a

2.4 不同保水剂浓度对高羊茅叶片 SOD,POD 含量的影响

超氧化物歧化酶(SOD)是需氧生物活性氧清除系统中第一个发挥作用的抗氧化酶,当生物体受到胁迫时可清除体内超氧阴离子自由基,从而抗御氧自由基对有机体的伤害^[20]。在不同供水条件下施加保水剂处理组 SOD 含量明显低于 CK 组,且差异显著。限量供水条件下,随保水剂浓度的上升,高羊茅幼苗 SOD 含量呈波动下降趋势,最低值出现在保水剂浓度为 0.40%时,较 CK 组降低 21.08%;足量供水条件下,最低值在保水剂浓度为 0.30%时,较 CK 组降低 7.99%(图 2)。

过氧化物酶(POD)是植物体内氧化还原酶的一种,可以催化有毒物质的氧化分解。限量供水条件下添加保水剂处理的高羊茅叶片 POD 含量明显低于

CK 组,在 0.20%~0.40%处理下 POD 含量差异较小[84.67~87.33 U/(g·min)],较 CK 组分别低 62.76%,62.76%和 61.58%。足量供水条件下,随保水剂浓度增加高羊茅叶片 POD 含量呈现先增加后下降的趋势,在保水剂浓度为 0.10%时与对照相比达到最大值(图 3)。

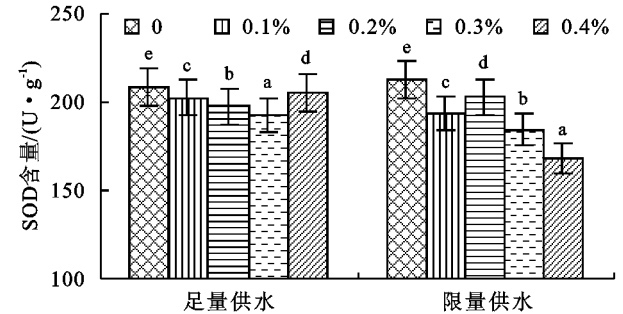


图 2 保水剂浓度下高羊茅叶片 SOD 变化

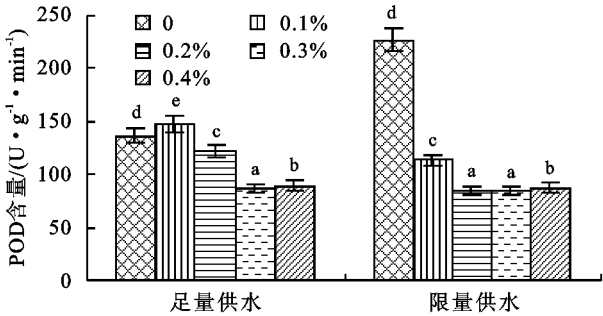


图 3 保水剂浓度下高羊茅叶片 POD 变化

2.5 不同保水剂浓度对高羊茅叶片 CAT 活性和 MDA 含量的影响

在不同水分条件下,适量添加保水剂会提高高羊茅叶片 CAT 活性。在较为干旱的限量供水条件下,保水剂浓度为 0.10%,0.20%处理时 CAT 活性高于 CK 组分别高 80.57%,60.42%。足量供水条件下,保水剂浓度为 0.10%,0.20%,0.30%时,CAT 活性高于 CK 组分别高 22.58%,80.07%,64.82%(图 4)。

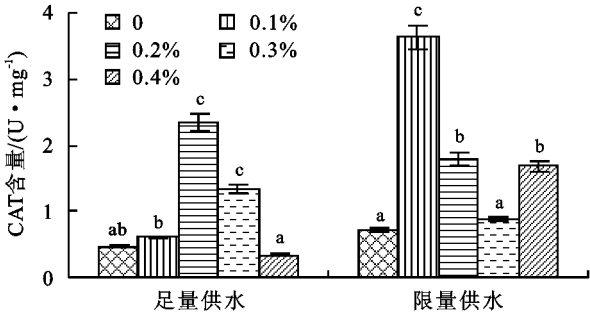


图 4 保水剂浓度下高羊茅 CAT 活性的影响

丙二醛(MDA)是脂质过氧化作用的主要产物之一,其含量的高低在一定程度上反映脂膜过氧化作用水平和膜结构的受害程度^[21]。在两种水分条件下,施加保水剂处理的高羊茅叶片 MDA 含量均要低于 CK 组。其中,在足量供水条件下,随保水剂浓度的增加高羊茅幼苗叶片 MDA 含量,分别比 CK 组减少 21.39%,26.92%,23.91%,45.98%,最低值出现在保水剂浓度为 0.40%处理;在限量供水条件下,分别比 CK 组减少 5.02%,1.63%,32.66%,29.22%,最低值出现在保水剂浓度为 0.30%处理(图 5)。

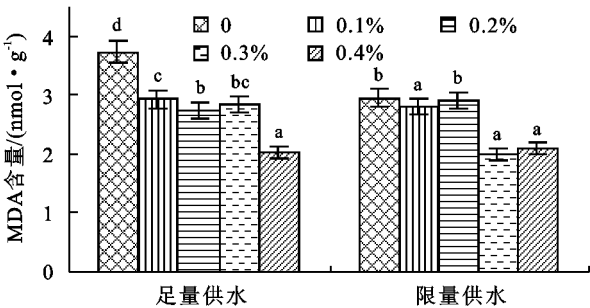


图 5 保水剂浓度下高羊茅 MDA 含量的影响

2.6 不同保水剂浓度对高羊茅根系活力的影响

根系是植物吸收水分和养分的主要器官,根系活力表示根系新陈代谢活动的强弱,是反映根系吸水能力的一项综合指标,其值越高表示植物地下部分活跃越旺盛,越利于植物生长。在限量供水条件下随保水剂浓度的增加高羊茅根系活力呈现先增加后下降的趋势,但各组处理均高于 CK 组,依次较 CK 组增加 12.58%,17.39%,16.42%,3.06%;在足量供水下,保水剂浓度仅在 0.20%处理时高于 CK 组,较 CK 高 6.51%(图 6)。施加保水剂组高羊茅根系活力提升,原因可能是保水剂通过将自身吸收的水分缓慢释放到植物根系周边的土壤中,不断释放的水分减缓了土壤干旱,促进了植物根系的正常生理代谢。

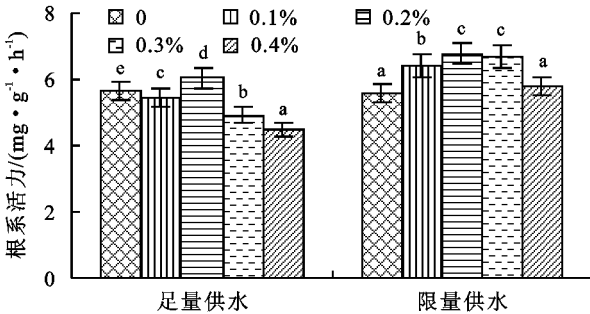


图 6 保水剂浓度下高羊茅根系活力的影响

2.7 不同保水剂浓度对高羊茅抗旱性影响

高羊茅抗旱性隶属函数分析以萌发率、萌发势、Chl a+b、Car、CAT、SOD、POD、丙二醛及根系活力 9 个指标为分析依据。其中,萌发率、萌发势、Chl a+b、Car、CAT 及根系活力采用隶属函数值分析,SOD、POD、丙二醛采用反隶属函数分析。通过分析并求其平均值以评价在不同保水剂浓度下高羊茅的抗旱性。结果表明,5 种保水剂浓度下高羊茅抗旱性顺序在足量供水条件下为 0.20%>0.30%>0.10%>0.40%>0.00%,限量供水条件下为 0.30%>0.40%>0.10%>0.20%>0.00%(表 3)。可见在不同土壤水分条件下,施加保水剂可提高高羊茅抗旱性。

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1) 高羊茅种子萌发率与幼苗生物量对不同保水剂浓度的响应。保水剂可在种子周围的土壤中形成一个“微型水库”,然后释放水分供种子萌发和植物生长,以改变土壤水分对植物种子萌发与幼苗生长的限制^[22-23]。本研究发现,不同水分条件下施加保水剂对高羊茅种子萌发率与发芽势的影响存在差异。一是在较为干旱的限量供水条件下,由于保水剂的持水性,施加保水剂对植物种子发芽率与发芽势的提升较为显

著,并在保水剂浓度为 0.40%处理时种子发芽率与发芽势达到最大,分别比对照增加 38.13%和 45.91%,与研究柠条、梭梭等植物所得到的结果类似^[24-25];二是在足量供水条件下与岳鹏鹏等^[14]研究保水剂对高羊茅种子萌发得出的趋势不一致。其认为在足量供水条件下,不同用量的保水剂对高羊茅种子萌发均无明显影响,但本试验结果表明,足量供水条件下当土壤中保水剂浓度超过 0.10%时,高羊茅种子发芽率与发芽势

会随保水剂浓度增加而下降,造成这种结果的原因可能是前人在培养皿中进行,而本试验是在土壤中进行,总体水分条件不相一致。有研究发现土壤中施加保水剂可促进植物生长,增加作物产量和生物量^[26-27],本研究在不同水分条件下,添加保水剂会提高植株生物量,并且在较为干旱的限量供水条件下添加保水剂对于幼苗生物量的影响更为显著,最优浓度下生物量可较 CK 组提升 46.02%,与前人研究结果相一致。

表 3 高羊茅幼苗抗旱性指标的隶属函数和综合性评价

测定指标	足量水分条件					限量水分条件				
	CK	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	CK	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%
萌发率	0.742	1.000	0.720	0.247	0.000	0.000	0.816	0.832	0.950	1.000
萌发势	0.725	1.000	0.700	0.184	0.000	0.000	0.822	0.773	1.000	0.995
Chl a+b	0.000	0.681	0.595	0.559	1.000	0.000	0.355	1.000	0.849	0.998
Car	0.000	0.599	0.607	0.651	1.000	0.000	1.000	0.114	0.346	0.368
CAT	0.141	0.277	2.014	1.000	0.000	0.000	1.000	0.368	0.052	0.272
POD	0.174	0.000	0.402	1.000	0.946	0.000	0.799	1.000	1.000	0.981
SOD	0.000	0.374	0.679	1.000	0.214	0.000	0.422	0.000	0.632	1.000
丙二醛	0.000	0.465	0.586	0.520	1.000	0.000	0.154	0.154	1.000	0.895
根系活力	0.747	0.608	1.000	0.278	0.000	0.000	0.683	1.000	0.933	0.150
均值	0.281	0.556	0.812	0.604	0.462	0.000	0.816	0.832	0.950	1.000
排序	5	3	1	2	4	5	3	4	1	2

(2) 高羊茅生理特性对不同保水剂浓度的响应。干旱会对植物的叶绿体造成伤害,使叶绿素和类胡萝卜素的含量下降^[28]。保水剂可通过对土壤水分的调节作用,间接提高植物幼苗叶片叶绿素含量,来保证植物对光能的充分利用,以增强植物体内的代谢活动^[29]。本研究证实在土壤中施加适量保水剂可提高高羊茅幼苗叶片叶绿素、类胡萝卜素及根系活力,并且在较为干旱的水分条件下提升更为显著。

不同水分条件下施加保水剂处理的高羊茅叶片保护酶活性和脂质过氧化产物 MDA 的含量均发生了变化。表现为施加保水剂处理的高羊茅叶片保护酶活性 SOD,POD 含量低于 CK 而 CAT 活性高于 CK,同时脂质过氧化产物 MDA 含量也低于 CK。原因可能是在水分缺乏的限量供水条件下,保水剂通过调节土壤水分的能力,减缓了土壤干旱,从而有利于高羊茅叶片 SOD,POD,CAT 协同作用,来保证植物自由基维持在一个较低水平,使植物叶片膜系统受伤减小,以减小脂质过氧化产物 MDA 的产生,最终减缓干旱对于植物的伤害^[30];而足量供水条件下,水分不缺乏却也导致了幼苗保护酶活性发生变化,原因可能是保水剂通过吸水性和减缓土壤水分蒸发的能力,使足量供水条件下土壤含水量不断增加,导致土壤透气性降低、供养能力下降,最终引起渗透调节物

质增加,使幼苗叶片保护酶活性和脂质过氧化产物含量发生变化,与管秀娟等^[31]研究结果相一致。

(3) 不同保水剂浓度下高羊茅抗旱性指标评价。不同浓度保水剂会对植物生长产生不同影响,单一的抗旱性指标难以全面反映植物对干旱适应的综合能力^[32],采用隶属函数分析取得的平均值,可以克服少数指标评价的不足,又因为平均值为 0~1 区间内纯数,使各项抗旱指标具有可比性。通过隶属函数综合分析,5 种保水剂浓度下高羊茅抗旱性顺序在足量供水条件下为 0.20%>0.30%>0.10%>0.40%>0.00%,限量供水条件下为 0.30%>0.40%>0.10%>0.20%>0.00%,与前人认为土壤中添加保水剂可提高植物抗旱性的结果相一致^[8,26,31]。另外,相比刘玉艳等^[33]认为高羊茅干旱胁迫超过 14 d 时会全部死亡的结论,本试验添加保水剂组在干旱胁迫 20 d 时高羊茅生长依然良好,也从侧面证明了添加保水剂可提高高羊茅抗旱性。

3.2 结论

综上所述,在不同水分条件下适量添加保水剂会提高高羊茅种子萌发率及幼苗抗旱性,其中,最优保水剂浓度在足量水分条件下为 0.20%,限量供水条件下为 0.30%。因此,在不同地区的高羊茅绿地建植与养护节水中应考虑加入浓度在 0.20%~0.30%

范围内的保水剂,这样有利于草坪建植和延长草坪灌溉时间。本文仅初步探讨了不同水分条件下,施加保水剂对高羊茅种子萌发与幼苗生长的影响,保水剂对高羊茅整个生长阶段的影响研究有待进一步开展。

参考文献:

- [1] 谭继清,谭继坚. 中国草坪与地被[M]. 重庆:重庆出版社,2000.
- [2] 赵陟峰,王冬梅,赵廷宁. 保水剂对煤矸石基质上高羊茅生长及营养吸收的影响[J]. 生态学报,2013,33(16): 5101-5108.
- [3] 樊瑞苹,周琴,周波,等. 盐胁迫对高羊茅生长及抗氧化系统的影响[J]. 草业学报,2012,21(1):112-117.
- [4] 汪昊磊,苏德荣,郑芳芳. 水分与草坪质量关系研究进展[J]. 草业科学,2008,25(7):104-108.
- [5] Bowman D C, Evans R Y. Calcium inhibition of polyacrylamide gel hydration is partially reversible by potassium[J]. Hortscience A Publication of the American Society for Horticultural Science, 1991,26(8):1063-1065.
- [6] 黄占斌,朱书全,张铃春,等. 保水剂在农业改土节水中的效应研究[J]. 水土保持研究,2004,11(3):57-60.
- [7] Gardner W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution 1,2[J]. Soil Science Society of America Journal, 1956,20(2): 151-153.
- [8] 杨永辉,武继承,吴普特,等. 保水剂用量对小麦不同生育期根系生理特性的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(1):73-78.
- [9] 毛思帅,Robiul Islam M,贾鹏飞,等. 保水剂和施肥量对沙地燕麦生产的影响[J]. 麦类作物学报,2011,31(2):308-313.
- [10] 谢勇,杜建军,李永胜. 保水剂对基质栽培菜心生长及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究,2008,15(4): 228-230.
- [11] 李芳,邓裕,洪丽芸. 水分胁迫下保水剂对高羊茅水分利用效果的作用[J]. 草业科学,2008,25(12):123-128.
- [12] 邓裕,邓湘雯,李芳,等. 保水剂对高羊茅生长和水分利用效率的影响[J]. 中南林业科技大学学报:自然科学版,2008,28(1):53-57.
- [13] 张袖丽,马友华,张文明,等. 保水剂对高羊茅种子萌发及幼苗生长发育的影响[J]. 安徽农业科学,2007,35(10):2871-2873.
- [14] 岳鹏鹏,纪晓玲,张静,等. 保水剂对高羊茅种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学,2014,44(4):144-145.
- [15] 张双兰,邱朝霞,邱海霞. 含蒙脱土和多糖的保水剂对高羊茅品种可奇思种子萌发及生长的影响[J]. 草原与草坪,2013,33(6):41-46.
- [16] 李丹,赵树兰,多立安. 施加稀土和保水剂对高羊茅初期生长的影响[J]. 中国草地学报,2012,34(3):88-93.
- [17] 王学奎. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [18] 刘学义. 大豆抗旱性评定方法探讨[J]. 中国油料,1986,4(2):23-26.
- [19] Thornber J P. Chlorophyll-proteins; light-harvesting and reaction center components of plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1975,26(1):127-158.
- [20] 马旭俊,朱大海. 植物超氧化物歧化酶(SOD)的研究进展[J]. 遗传,2003,25(2):225-231.
- [21] 裴斌,张光灿,张淑勇,等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报,2013,33(5):1386-1396.
- [22] Arbona V, Iglesias D J, Jacas J, et al. Hydrogel substrate amendment alleviates drought effects on young citrus plants[J]. Plant and Soil, 2005,270(1):73-82.
- [23] Omidian H, Rocca J G, Park K. Advances in superporous hydrogels[J]. Journal of Controlled Release, 2005,102(1):3-12.
- [24] 李加国,郎思睿,汪晓峰. 保水剂包衣对柠条种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 干旱区研究,2014,31(2):307-312.
- [25] 李兴,蒋进,宋春武,等. 保水剂对梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白梭梭(*Haloxylon persicum*)种子萌发及幼苗根系的影响[J]. 干旱区研究,2012,29(5):797-801.
- [26] 庄文化,吴普特,冯浩,等. 土壤中施用聚丙烯酸钠保水剂对冬小麦生长及产量影响[J]. 农业工程学报,2008,24(5):37-41.
- [27] 黄占斌,吴雪萍,方峰,等. 干湿变化和保水剂对植物生长和水分利用效率的影响[J]. 应用与环境生物学报,2002,8(6):600-604.
- [28] González-Rodríguez A M, Martín-Olivera A, Morales D, et al. Physiological responses of tagasaste to a progressive drought in its native environment on the Canary Islands[J]. Environmental and Experimental Botany, 2005,53(2):195-204.
- [29] 孔艳菊,孙明高,胡学俭,等. 干旱胁迫对黄栌幼苗几个生理指标的影响[J]. 中南林业科技大学学报:自然科学版,2006,26(4):42-46.
- [30] 谢志玉,张文辉,刘新成. 干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响[J]. 西北植物学报,2010,30(5):948-954.
- [31] 管秀娟,武继承. 不同土壤水分条件下保水剂对小麦幼苗生理特性的影响[J]. 河南农业科学,2010(8):28-32.
- [32] 张寅媛,刘英,白龙. 干旱胁迫对4种景天科植物生理生化指标的影响[J]. 草业科学,2014,31(4):724-731.
- [33] 刘玉艳,赵会芝,伍敏华,等. 干旱胁迫下马蔺与高羊茅的生理反应比较[J]. 河北农业大学学报,2008,31(4): 41-46.