

酸、铝胁迫对楚雄南苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响*

梅文君^{1#}, 许义兰^{1#}, 杨永莲², 段新慧¹, 姜 华¹, 陶 杨¹, 韩 博^{1**}

(1. 云南农业大学 动物科学技术学院, 云南 昆明 650201; 2. 永平县草山饲料工作站, 云南 永平 672600)

摘要:【目的】研究酸、铝胁迫对楚雄南苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响, 为酸性土壤中苜蓿的栽培提供理论依据和参考。【方法】以楚雄南苜蓿种子为材料, 按照不同 pH 值 (3.5、4.5、5.5、6.5 和 7.5) 和不同 Al^{3+} 质量浓度 (0、100、300、500、700 和 1 000 mg/L) 分别配置 30 种溶液, 生长 10 d 后对楚雄南苜蓿种子的发芽率、发芽势、根长、茎长、POD 和 SOD 等指标进行测定分析。【结果】微酸条件下 (pH 5.5~6.5), 楚雄南苜蓿种子萌发、生长良好, 当 pH 为 3.5 时种子萌发与生长受到明显抑制; Al^{3+} 质量浓度大于 500 mg/L 时, 发芽率、发芽势和根长等显著低于其他处理 ($P<0.05$), 且幼苗根长对 Al^{3+} 质量浓度的变化更为敏感; 酸、铝共同胁迫对楚雄南苜蓿种子萌发以及幼苗生长的影响大于单一胁迫, 在 pH 低于 4.5、 Al^{3+} 质量浓度高于 500 mg/L 时, 楚雄南苜蓿幼苗的生长受到明显的抑制。【结论】楚雄南苜蓿在 pH 大于 4.5、 Al^{3+} 质量浓度低于 500 mg/L 的土壤条件下可大力推广种植。

关键词: 楚雄南苜蓿; 酸、铝胁迫; 种子萌发; 幼苗生长

中图分类号: S 541.034

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2019) 06-1012-06

Effects of Acid Aluminum Stress on the Seed Germination and Seeding Growth of *Medicago hispida* cv. Chuxiong

MEI Wenjun¹, XU Yilan¹, YANG Yonglian², DUAN Xinhui¹,
JIANG Hua¹, TAO Yang¹, HAN Bo¹

(1. College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201 China;

2. Yongping Forage Working Station, Yongping 672600 China)

Abstract: [Purpose] To study the effects of acid and aluminum stress on the seed germination and growth of *Medicago hispida* cv. Chuxiong, and provide a theoretical basis and reference for the improvement and cultivation of alfalfa in acid soil. [Method] In this experiment, *M. hispida* cv. Chuxiong was used as the material, and 30 solutions (pH 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5+ Al^{3+} 0, 100, 300, 500, 700, 1 000 mg/L) were prepared according to different pH values and corresponding aluminum ion concentrations. After 10 days of treatment, the seed germination rate, germination potential, root length, stem length, POD and SOD were determined and calculated. [Result] The germination and seedling growth were well under slight acid conditions (pH 5.5-6.5), the germination and seedling growth of *M. hispida* cv. Chuxiong had a greater negative effect than other treatments. The germination and

收稿日期: 2018-11-21

修回日期: 2018-12-27

网络首发时间: 2019-11-29 11:03:10

*基金项目: 云南省重点研发计划项目 (2018BB0002-02); 云南省教育厅基金项目 (2016ZZX104)。

作者简介: #对本文贡献等同, 为并列第一作者。梅文君 (1996—), 女, 云南安宁人, 在读硕士研究生, 主要从事草地生态学研究。E-mail: 1273922036@qq.com; 许义兰 (1996—), 女, 云南红河人, 学士, 主要从事牧草育种引种研究。E-mail: 1074011412@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 韩博 (1983—), 女, 陕西渭南人, 博士, 讲师, 主要从事牧草遗传育种与逆境生物学研究。E-mail: hanbo1983@126.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20191129.0947.002.html>



seedling growth were seriously reduced by higher Al^{3+} treatments ($\text{Al}^{3+}>500\text{ mg/L}$) which resulted in a significant decrease in the growth index ($P<0.05$). The combination of *M. hispida* cv. Chuxiong were greater than those of either stress in isolation. Even the treatment of $\text{pH}<4.5$ and $\rho(\text{Al}^{3+})>500\text{ mg/L}$ had a significant negative effect on seed germination and growth. [**Conclusion**] *M. hispida* cv. Chuxiong can be widely planted under the conditions of pH greater than 4.5 and $\rho(\text{Al}^{3+})$ less than 500 mg/L.

Keywords: *Medicago hispida* cv. Chuxiong; acid and aluminum stress; seed germination; seedling growth

据统计, 全世界约有 39.5 亿 hm^2 的酸性土壤, 其中可耕地面积约为 1.79 亿 hm^2 , 大部分分布在热带、亚热带及温带地区^[1]。中国酸性土壤的分布遍及 15 个省区, 总面积达 203 万 hm^2 , 约占中国耕地面积的 21%^[2]。当土壤 pH 值低于 5.5 时, 土壤中的高活性铝含量增加, 严重制约了植物的生长发育, 铝毒害是酸性土壤中植物生长发育的主要限制因子^[3]。

楚雄南苜蓿 (*Medicago hispida* cv. Chuxiong) 是豆科苜蓿属一年生或越年生草本植物, 在云南省楚雄州禄丰县已推广种植 60 年以上, 是冬春季种植的优良豆科牧草, 具有饲用价值高、固氮能力强、耐旱、耐酸铝等特点, 是酸性土壤上可种植的优质豆科牧草之一。随着畜牧业的大力发展, 优质豆科牧草的重要作用已引起高度重视。苜蓿作为主要的豆科牧草在北方种植面积较大, 在南方因为土壤偏酸性其栽培受到了限制, 不能满足畜牧业的均衡发展。作为云南省地方品种, 楚雄南苜蓿已有 60 多年的栽培种植历史, 在酸性土壤中生长发育良好, 但是目前对楚雄南苜蓿的研究主要集中在种子产量^[4]、生长特性^[5-6]和高产栽培等方面。因此, 本试验对楚雄南苜蓿在不同酸、铝胁迫条件下的萌发特性进行深入研究, 观察发芽相关指标和根长、茎长及其生理指标的变化, 以期发现其对酸、铝作用的规律, 为酸性土壤中苜蓿的改良和栽培提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 种子

供试种子为楚雄南苜蓿, 由云南省楚雄州禄丰县彩云镇兽医站提供。

1.1.2 化学试剂

用 0.1 mol/L NaOH、0.1 mol/L HCl、六水氯

化铝和蒸馏水配制出 30 种溶液以供试验。

1.2 方法

1.2.1 胁迫处理

本试验设置 5 个 pH 水平, 6 个 Al^{3+} 质量浓度, 共计 30 个胁迫处理, 具体见表 1。

表 1 不同 pH 值和 Al^{3+} 质量浓度胁迫处理
Tab. 1 Different pH values and Al^{3+} mass concentrations stress treatments

pH	$\rho(\text{Al}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$					
3.5	0	100	300	500	700	1 000
4.5	0	100	300	500	700	1 000
5.5	0	100	300	500	700	1 000
6.5	0	100	300	500	700	1 000
7.5	0	100	300	500	700	1 000

1.2.2 种子萌发试验

本试验于 2018 年 4 月在云南农业大学草业科学实验室进行。挑选饱满且健康的种子, 75% 乙醇消毒后用蒸馏水反复冲洗干净, 置于铺有 3 层滤纸, 且滴加等量 (20 mL) 培养液 (对应 pH 值和 Al^{3+} 质量浓度) 的干净培养皿中, 保持基质湿润, 每个处理 3 次重复, 每个重复 50 粒种子。将培养皿置于 25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温, 16/8 h 的光照培养箱中培养。

1.2.3 指标测量

每天观察种子发芽以及幼苗生长情况, 记录发芽种子数, 发芽率按 10 d 计算, 所用方法如下^[7]:

发芽率 (GR)= $\sum G_t/T\times 100\%$;

发芽势 (GP)= $\sum G'_t/T\times 100\%$;

发芽指数 (GI)= $\sum G_t/D_t$;

活力指数 (VI)=GI $\times$ S。

式中, G_t 为 10 d 内的发芽数; T 为供试种子数; G'_t 为前 4 d 内发芽数; D_t 为发芽的日数; S 为单株幼苗平均鲜重。

根长和茎长测定: 发芽第 10 天, 从每个培

养皿随机挑出 10 株进行测量、称重, 计算平均值。将长出真叶的幼苗移栽至 1 L 的塑料瓶中(去掉上半部), 用 Hoagland 培养液培养(调整至对应的 pH 值和 Al^{3+} 质量浓度), 通气泵进行通气, 每天 2 次, 每次通气 4 h。10 d 后选取长势一致的植株测量其丙二醛含量、过氧化物酶(POD) 和超氧化物歧化酶(SOD) 活性^[8]。

1.3 数据分析

用 Excel 2010 处理数据, SPSS 19.0 进行方差分析和 Duncan's 多重比较。

2 结果与分析

2.1 酸、铝胁迫对种子萌发的影响

由表 2 可知: 在 pH 5.5~7.5, Al^{3+} 质量浓度为 0~500 mg/L 条件下, 楚雄南苜蓿种子发芽率较高, 同时各处理间差异不显著 ($P>0.05$)。当 pH 值低于 4.5、 Al^{3+} 质量浓度大于 300 mg/L 时, 发芽率迅速下降, 说明微酸微碱条件下, 楚雄南苜蓿发芽率对铝毒害有较强的耐受性, 酸性越强, 种子发芽越是易受 Al^{3+} 质量浓度的影响。单纯酸胁迫下, 种子发芽率随着 pH 值的降低而降低, 在 pH 5.5 时发芽率最高, 与 pH 3.5 和 4.5 处理间达到差异显著 ($P<0.05$)。楚雄南苜蓿的发芽率 (pH 5.5) 和发芽势 (pH 7.5) 在 Al^{3+} 质量浓度均

为 0 mg/L 最高, 在 pH 3.5、 Al^{3+} 质量浓度 1 000 mg/L 时最低。

2.2 酸、铝胁迫对幼苗生长的影响

由表 3 可知: 茎长在 Al^{3+} 质量浓度为 0~500 mg/L 之间的不同 pH 胁迫下, 均无显著差异; 当 Al^{3+} 质量浓度达到 700 mg/L 时, 茎长生长受到明显抑制。在 pH 6.5、 Al^{3+} 质量浓度为 100 mg/L 时茎长最长 (1.56 cm), 在 pH 3.5、 Al^{3+} 质量浓度为 1 000 mg/L 时最短 (0.47 cm)。根长在 pH 6.5、 Al^{3+} 质量浓度为 0 mg/L 时最长 (4.18 cm), 在 pH 3.5、 Al^{3+} 质量浓度为 1 000 mg/L 时最短 (0.48 cm)。无论哪种酸胁迫下, 根长和茎长在 Al^{3+} 质量浓度大于 500 mg/L 时均迅速下降, 且根长比茎长对酸、铝胁迫更为敏感。综合来看, 在 pH 6.5、 Al^{3+} 质量浓度为 0~500 mg/L 处理下, 楚雄南苜蓿幼苗生长状况优于其他处理, 表明微酸环境有利于楚雄南苜蓿幼苗抵御铝毒害。

2.3 酸、铝胁迫对幼苗生理特性的影响

由表 4 可知: 不同酸胁迫下, 随着 Al^{3+} 质量浓度的上升, 幼苗丙二醛含量均不同程度增加。pH 3.5 和 4.5 处理下, 丙二醛含量明显高于其他处理组。丙二醛含量在 pH 3.5、 Al^{3+} 700~1 000 mg/L 处理时处于最高水平, 这表明在强酸高铝胁迫下, 幼苗细胞膜受到破坏较大。在 pH 6.5、 Al^{3+}

表 2 酸、铝胁迫对种子萌发的影响
Tab. 2 Effects of acid and aluminum stress the on seed germination

$\rho(\text{Al}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	发芽率/% germination rate				
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
0	42.00 Ab	42.57 Ab	48.00 Aa	46.00 Aab	45.33 Aab
100	40.67 Ab	42.00 Aab	43.67 Aa	44.33 ABa	45.33 Aa
300	41.00 Ab	41.33 Ab	44.60 Aa	44.20 ABa	45.00 Aa
500	30.00 Bb	34.00 Bb	44.67 Aa	44.00 ABa	44.50 ABa
700	22.50 Cb	24.00 Cb	26.00 Bab	29.50 Ba	29.00 Ba
1 000	12.00 Db	13.33 Dab	15.00 Cab	19.00 Ca	19.00 Ca

$\rho(\text{Al}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	发芽势/% germination energy				
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
0	41.50 Aa	42.65 Aa	44.67 Aa	44.67 Aa	48.67 Aa
100	41.00 Aa	40.67 ABa	42.67 Aa	42.50 Aa	42.67 Aa
300	39.00 Abc	37.33 ABc	42.67 Aa	40.00 Aabc	42.00 Aab
500	32.00 Aa	37.00 ABa	42.00 Aa	44.00 Aa	42.67 Aa
700	21.00 Bc	24.00 Cbc	24.67 Babc	29.00 Bab	20.00 Ba
1 000	12.00 Cb	13.00 Dab	14.50 Cab	18.50 Ca	18.00 Bab

注: 同列比较, 不同大写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 同行比较, 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 下同。
Note: Compared with the same column, different capital letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$); compared with the same line, different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$); the same as below.

表 3 酸、铝胁迫对种子幼苗生长的影响

Tab. 3 Effects of acid and aluminum stress on the seedling growth

$\rho(\text{Al}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	茎长/cm stem length				
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
0	1.07 ABb	1.12 ABb	1.18 ABb	1.54 Aa	1.45 Aa
100	1.36 Aab	1.28 Ab	1.31 Aab	1.56 Aa	1.42 Aa
300	1.02 ABa	1.01 Ba	1.05 Ba	1.04 Ba	0.92 Ba
500	0.80 Bab	1.01 Ba	1.03 Ba	0.89 BCab	0.83 Bab
700	0.54 Cb	0.72 Ca	0.71 Ca	0.68 Cab	0.74 BCa
1 000	0.47 Cb	0.61 Ca	0.57 Da	0.54 Cab	0.61 Ca

$\rho(\text{Al}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	根长/cm root length				
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
0	2.33 Ad	3.07 Ac	3.49 Aab	4.18 Aa	3.59 Aab
100	1.25 Bd	2.65 ABc	3.74 Aab	4.00 Aa	3.90 Aa
300	0.92 BCd	1.29 Cc	3.88 Aab	4.02 Aa	3.01 ABb
500	0.92 BCd	1.28 Cc	2.09 Bbc	3.95 ABa	2.79 Bb
700	0.58 Dcd	0.72 Dc	1.18 Cbc	2.84 Ca	1.72 Cb
1 000	0.48 Dbc	0.59 Db	0.68 Db	1.00 Da	0.53 Db

表 4 酸、铝胁迫对幼苗生理特性的影响

Tab. 4 Effects of acid and aluminum stress on the physiological characteristics of seedlings

$\rho(\text{Al}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	丙二醛含量/(nmol·g ⁻¹) MDA content				
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
0	29.48 Ca	25.91 Ca	24.25 Bab	19.42 Bb	20.27 Bb
100	34.28 BCa	29.97 Bab	23.26 BCb	18.66 Bc	20.70 Bbc
300	36.60 Ba	27.54 Bab	21.89 Cb	19.49 Bc	24.73 Bb
500	40.59 Ba	31.57 Bb	30.54 ABb	28.30 ABb	26.07 ABc
700	43.07 ABa	37.04 Aab	36.56 Aab	32.59 Ab	29.37 Abc
1 000	50.42 Aa	42.13 Ab	36.50 Abc	32.93 Ac	30.36 Ac

$\rho(\text{Al}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	POD 活性/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹) POD activity				
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
0	78.45 Abc	80.22 Abc	96.00 Aa	90.00 Aab	85.67 Ab
100	75.55 Ab	76.57 Ab	91.56 ABa	92.78 Aa	74.22 Bb
300	76.44 Ab	73.33 ABb	88.67 ABa	80.44 Bab	76.45 ABb
500	71.11 ABb	67.11 Bbc	81.56 Ba	76.00 Bab	67.11 Bbc
700	68.89 Bab	60.22 Cb	73.11 Ca	70.89 BCa	58.11 Cb
1 000	60.78 Bb	60.89 Cb	70.22 Ca	62.44 Cab	57.11 Cbc

$\rho(\text{Al}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	SOD 活性/(U·g ⁻¹) SOD activity				
	pH 3.5	pH 4.5	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
0	487.53 Bb	495.71 ABb	557.87 Ba	579.14 BCa	512.06 Aab
100	491.37 Bb	496.28 ABb	588.28 ABa	593.58 Ba	487.32 ABb
300	533.33 ABbc	574.23 Ab	605.11 Ab	687.12 Aa	482.21 ABc
500	601.84 Ab	552.96 Abc	620.04 Ab	719.84 Aa	505.11 Ac
700	550.92 ABa	474.44 BCb	427.20 Cbc	584.50 Ba	464.21 Bb
1 000	462.58 BCab	479.14 BCab	374.03 CDc	514.40 Ca	365.85 Cc

质量浓度 0~300 mg/L 处理时, 幼苗丙二醛含量最低, 说明楚雄南苜蓿幼苗在微酸环境和低质量

浓度 Al^{3+} 胁迫下依旧生长良好。

在 pH 3.5、4.5 和 7.5 处理下, 无论 Al^{3+} 质量

浓度怎么变化, 楚雄南苜蓿幼苗的 POD 活性均小于 pH 5.5 和 pH 6.5。在 pH 7.5、 Al^{3+} 为 1 000 mg/L 时, POD 活性最低; 在 pH 5.5、pH 6.5、 Al^{3+} 为 0~100 mg/L 时, POD 活性最高。这意味着强酸弱碱条件下, 较高质量浓度 Al^{3+} (>700 mg/L) 对 POD 活性影响较大, 在微酸条件下, 低质量浓度 Al^{3+} (<300 mg/L) 对 POD 活性影响较小。

SOD 活性的大小反映了幼苗对酸、铝胁迫的适应能力。从表 4 中可见: 在不同酸处理下, Al^{3+} 质量浓度越高, 幼苗 SOD 活性先上升后下降, 均在 Al^{3+} 质量浓度为 500 mg/L 时达到最高值之后迅速下降, 这可能是铝胁迫超过了其承受范围而导致 SOD 酶活性下降。其中, 在 pH 6.5、 Al^{3+} 质量浓度 500 mg/L 时 SOD 活性最高, pH 7.5、 Al^{3+} 质量浓度 1 000 mg/L 时 SOD 活性最低。

3 讨论

土壤 pH 值对植物的生长^[9]和养分的获取^[10-11]影响非常大, 每种植物对 pH 的适应范围是不同的。本研究发现, 单一酸胁迫下, 楚雄南苜蓿种子的发芽率、发芽势等都随着 pH 值的降低而降低。在强酸性 (pH 3.5) 环境下, 楚雄南苜蓿幼苗根长、茎长等显著低于其他 pH 处理, 其中, 弱酸条件下各生长指标整体良好, 可以理解为弱酸对种子发芽以及幼苗生长表现出一定的促进作用。这与李靖^[12]、杨丹娜等^[13]和李剑峰等^[14]研究结果一致, 但是楚雄南苜蓿耐酸性更强一些。在 pH 6.5 时, 南苜蓿根长和茎长均达到最大值, 之后随着 pH 值的下降迅速下降, 尤其是根长, 这说明根生长受酸度影响较大。

酸性土壤中植物生长受到抑制和铝毒害有直接关系, 铝毒害已成为酸性土壤中植物生长受限的主要因素^[15-16], 但是不同植物对铝毒害的耐受能力不同。本研究发现: 随着 Al^{3+} 质量浓度的升高, 楚雄南苜蓿发芽率、发芽势、根长和茎长均呈下降趋势, 生长明显受到限制。 Al^{3+} 质量浓度为 0~300 mg/L 是楚雄南苜蓿的最适生长区, 当 Al^{3+} 质量浓度大于 700 mg/L 时, 不适合其生长, 这与宫家珺等^[17]的研究结果相似。同时, 根长对铝离子的反应最为敏感, 这与目前大部分研究结果^[18-22]相同。与其他酸性红壤区常见作物^[23-26]不同的是, 楚雄南苜蓿能够在 Al^{3+} 质量浓度为 700 mg/L 的环境下生存并且保持一定的生活力, 说明其具有非常强的耐酸铝毒能力, 在酸性土壤

分布区有巨大的应用前景, 为其他豆科牧草的栽培提供参考。但是楚雄南苜蓿作为云南省地方品种, 其解除铝胁迫的生理及分子机制还有待进一步研究。

本研究发现: 酸、铝共同胁迫比单一胁迫对楚雄南苜蓿芽苗的生长抑制作用明显。单一酸胁迫下, pH 3.5 时, 幼苗根长、茎长与其他 pH 处理之间差异显著; 单一铝胁迫下, 当 Al^{3+} 质量浓度为 700 mg/L 时, 其各项生长指标与其他铝胁迫处理之间差异显著; 而在酸、铝共同胁迫下, 当 pH<4.5, Al^{3+} 质量浓度大于 500 mg/L 时, 楚雄南苜蓿的发芽率、发芽势、根长和茎长等生长指标均表现出明显的下降, 其中根长对酸、铝胁迫更为敏感, 在 Al^{3+} 质量浓度大于 300 mg/L 时即受到明显抑制, 可见低 pH 值加剧了铝毒害的发生, 这在紫花苜蓿^[13, 27]、玉米^[28]和荞麦^[29]等酸铝胁迫研究中也观察到类似的结果。

逆境下, 丙二醛是植物膜脂过氧化的主要产物, 受迫害程度越大, 含量越高^[30]; 超氧化物歧化酶 (SOD) 能消除生物体在各种环境胁迫下产生的有害物, 它的作用占 90% 以上^[31]; 过氧化物酶 (POD) 随着胁迫程度的增强, 其活性越大^[32]。本试验中, MDA 含量随着酸或铝的胁迫程度增强而增加, SOD 活性随酸或铝的胁迫程度增强呈先增加后减少的趋势, 这可能是铝胁迫超过了其承受范围而导致 SOD 酶活性下降。POD 活性在酸、铝胁迫中变化不显著, 这说明楚雄南苜蓿幼苗在强酸或高质量浓度铝胁迫下可能通过维持较高的过氧化物保护酶来抵御伤害。在本试验中, 虽然在 pH 3.5、500 mg/L Al^{3+} 处理时, SOD、POD 活性均达到最高, 但与其他处理间的差异不一致。有关植物在逆境条件下生理指标变化的研究已经有许多报道, 结果不尽相同, 这可能与不同植物的抗逆能力、体内保护酶系统的活力和抗氧化物质含量、毒害程度、外界环境影响等因子的不同有关。

4 结论

(1) 酸胁迫下, 楚雄南苜蓿幼苗生长受到限制, 且根的生长受影响较大, 并且随着酸性的增强抑制作用明显增强。在 pH 5.5 处理下, 各类指标表现较好, 明显优于其他处理, 说明楚雄南苜蓿在微酸性环境下生长良好。

(2) 楚雄南苜蓿在 Al^{3+} 质量浓度 0~500 mg/L 之间可以正常生长, 当 Al^{3+} 质量浓度达到 700 mg/L 时, 其生长受到明显抑制, 且幼苗根长对 Al^{3+} 质量浓度的变化更为敏感。

(3) 酸铝共同胁迫对楚雄南苜蓿种子萌发以及幼苗的生长影响大于单一胁迫, 在 pH 低于 4.5, Al^{3+} 质量浓度高于 500 mg/L, 楚雄南苜蓿幼苗的生长受到明显的抑制。

[参考文献]

- [1] KOCHIAN L V, HOEKENGA O A, PIÑEROS M A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency[J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55(1): 459. DOI: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655.
- [2] 熊毅, 李庆远. 中国土壤[M]. 2版. 北京: 科学出版, 1987.
- [3] HARTWELL B L, PEMBER F R. The presence of aluminum as a reason for the difference in the effects of so-called acid soil on barley and rye[J]. Soil Science, 1918, 6(4): 259. DOI: 10.1097/00010694-191810000-00001.
- [4] 于靖麒, 王文涛, 徐驰, 等. 产业化生产中楚雄南苜蓿种子脱粒技术的研究[J]. 牧草与饲料, 2008, 2(4): 38.
- [5] 段正山, 袁福锦, 徐英, 等. 楚雄南苜蓿生物学特性及生产性能测定[J]. 养殖与饲料, 2012(5): 29. DOI: 10.13300/j.cnki.cn42-1648/s.2012.05.006.
- [6] 赵业宁. 楚雄南苜蓿的性状及表现分析[J]. 云南畜牧兽医, 2014(1): 31. DOI: 10.3969/j.issn.1005-1341.2014.01.023.
- [7] 毕辛华, 戴心维. 种子学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.
- [8] 赵海泉. 基础生物学指导[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [9] 王京元, 阎俊崎, 陈霞, 等. 土壤 pH 值对盆栽大豆幼苗的影响[J]. 江西农业学报, 2012, 24(2): 96. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2012.02.029.
- [10] JOSÉ A R M, MANUEL L A, JOSE M G C. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geo-statistical methods to study spatial variations[J]. Environmental Pollution, 2006, 144(3): 1001. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.01.045.
- [11] 王海云, 姜远茂, 彭福田, 等. 胶东苹果园土壤有效养分状况及与产量关系研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2008, 39(1): 31. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2008.01.008.
- [12] 李靖. 几种类型酸铝胁迫对紫花苜蓿萌发期生长的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [13] 杨丹娜, 骆夜烽, 谢家琪, 等. 酸、铝胁迫对苜蓿种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(8): 103. DOI: 10.11686/cyxb2014362.
- [14] 李剑峰, 师尚礼, 张淑卿. 环境酸度对紫花苜蓿早期生长和生理的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(2): 47. DOI: 10.11686/cyxb20100207.
- [15] VON UEXKÜLL H R, MUTERT E. Global extent, development and economic impact of acid soils[J]. Plant and Soil, 1995, 171(1): 1. DOI: 10.1007/BF00009558.
- [16] FOY C D, CHANEY R L, WHITE M C. The physiology of metal toxicity in plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978, 29(1): 511. DOI: 10.1146/annurev.pp.29.060178.002455.
- [17] 宫家珺, 李剑峰, 安渊. 酸性土壤中铝离子对紫花苜蓿生长和生理的影响[J]. 中国草地学报, 2008, 30(3): 52.
- [18] 胡锦涛, 李靖, 尚丹, 等. 酸铝胁迫对狼尾草种子萌发和幼苗恢复生长的影响[J]. 种子, 2015, 34(12): 21. DOI: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2015.12.021.
- [19] 张柳. 铝胁迫下楚雄南苜蓿发芽率及其根系形态变化的研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2017.
- [20] SAMUELS T D, KÜÇÜKAKYÜZ K, RINCÓN ZACHARY M. Al partitioning patterns and root growth as related to Al sensitivity and Al tolerance in wheat[J]. Plant Physiology, 1997, 113(2): 527. DOI: 10.1104/pp.113.2.511.
- [21] RENGEL Z, ROBIN D L. Aluminum effects on micronutrient uptake by annual ryegrass[J]. Agronomy Journal, 1989, 81(2): 208. DOI: 10.1080/0010362890-9368081.
- [22] FOY C D, MURRAY J J. Responses of Kentucky bluegrass cultivars to excess aluminum in nutrient solutions[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(9): 1967. DOI: 10.1080/01904169809365537.
- [23] 陈志刚, 张红蕊, 周晓红, 等. 铝胁迫对黑麦草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 207.
- [24] 刘拥海, 俞乐, 吴国创. 不同 pH 值条件下酸铝对水稻种子萌发和根系生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4397. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2008.11.069.
- [25] 俞慧娜, 刘闻川, 张晓燕, 等. 9 种杂草植物相对铝耐性的特征分析[J]. 草业科学, 2009, 26(11): 130.
- [26] NOGUEIROL R C, MONTEIRO F A, GRATÃO P L, et al. Tropical soils with high aluminum concentrations cause oxidative stress in two tomato genotypes[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187: 73. DOI: 10.1007/s10661-015-4282-3.
- [27] 党甲军, 高洁, 刘晓辉, 等. 低 pH 与酸铝对甜玉米幼苗生长的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2009, 34(3): 146. DOI: 10.13718/j.cnki.xsxb.2009.03.022.
- [28] 李朝苏, 刘鹏, 蔡妙珍, 等. 荞麦对酸铝胁迫生理响应的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 105. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2005.03.026.
- [29] 骆夜烽. 酸铝胁迫对维多利亚苜蓿萌发的影响及四种微肥的脱胁迫效果研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.
- [30] 霍平慧, 李剑峰, 师尚礼, 等. 超干及老化处理对紫花苜蓿种子活力和生理变化的影响[J]. 中国草地学报, 2011, 33(3): 28.
- [31] 杨春祥, 李宪利, 高东升. 钙对低温胁迫下油桃果实膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. 落叶果树, 2004, 36(6): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2910.2004.06.001.
- [32] 姜义宝, 杨玉荣, 王成章. 高温胁迫下苜蓿生理生化特性研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(5): 820. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2007.05.038.

责任编辑: 何承刚