

铝胁迫对海莲幼苗保护酶系统 及脯氨酸含量的影响

马丽, 杨盛昌*

(厦门大学生命科学学院滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 福建厦门 361005)

摘要: 为探讨 Al^{3+} 胁迫对海莲的影响, 研究了 10~50 mmol/L Al^{3+} 处理下海莲幼苗叶片和根系的过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性以及可溶性蛋白质、丙二醛(MDA)和游离脯氨酸(Pro)含量的变化。结果表明, 海莲幼苗能耐受 50 mmol/L 的 Al^{3+} 胁迫处理, 具有较高的耐铝性。但在 50 mmol/L Al^{3+} 处理时, 海莲幼苗叶片和根系的质膜系统膜脂过氧化加重, MDA 含量增加; 细胞活性氧代谢失衡。在保护酶系统中, Al^{3+} 处理促进了叶片中 APX 和 POD 活性的提高, 降低了 CAT 的活性, SOD 的活性呈下降趋势; 海莲根部 POD 和 SOD 活性均显著提高, 而 CAT 活性下降。25~50 mmol/L Al^{3+} 处理下, 海莲叶片和根部可溶性蛋白质含量均显著下降; Pro 的含量在叶片和根均有显著增加。

关键词: 海莲; 铝胁迫; 保护酶系统; 脯氨酸

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2009)05-0648-05

Effect of aluminium on protection enzyme system and proline of *Brugiera sexangula* seedlings

MA Li, YANG Sheng-Chang*

(Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystem,
School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The activity of POD, CAT, SOD, APX, the content of soluble protein, MDA and proline in the leaves and roots of *Brugiera sexangula* were studied under 10–50 mmol/L $AlCl_3$ treatments. The results showed that, *B. sexangula* had strong tolerance to high concentrations of Al^{3+} , even 50 mmol/L of Al^{3+} , but under this concentration, the membrane system in the leaves and roots were seriously damaged due to peroxidation, while the content of MDA increased and the active oxygen metabolism of the cells were unbalanced. In protection enzyme system, Al^{3+} treatments concentrated on the raising of APX and POD activity, reducing of CAT and SOD activity in leaves; for the roots, the POD and SOD activity were significantly increased, while the CAT activity were decreased. Under treatments of 25–50 mmol/L Al^{3+} , in both leaves and roots, the soluble protein content decreased evidently but the Pro content increased.

Key words: *Brugiera sexangula*; Al stress; protection enzyme system; proline

铝是自然界中丰度最高的金属元素, 占地壳质量 7% 左右, 无机离子态的铝在酸性条件下大量渗出, 污染了生态环境, 严重危害了农作物和森林树种

的生长(孔繁翔等, 2000)。铝离子对植物的伤害反映在: 影响植物营养成分的吸收与代谢, 破坏细胞膜的结构和功能, 影响保护酶的活性, 使植物生长停

收稿日期: 2008-01-08 修回日期: 2008-12-20

基金项目: 福建省自然科学基金(B0510003)[Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province(B0510003)]

作者简介: 马丽(1982-), 女(满族), 河北承德人, 硕士, 发育生物学专业, 主要从事植物生理学研究, (E-mail)mary20030801@yahoo.com.cn.

* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail:scyang@xmu.edu.cn)

止,根系、茎部和叶片功能坏死等,这在小麦(Dark等,2004)、水稻(Ma等,2002)、马尾松(曹洪法等,1992)、茶树(陆建良等,1997)、龙眼(肖祥希等,2003)、荞麦(王芳等,2006)植物中已得到研究。

红树林是生长于热带和亚热带海岸和河口潮间带的木本植物群落,具有防风固堤,净化环境和维护生态平衡等作用。特殊的生境造就了红树植物耐盐和抗水淹等生理生态学特性。已有的研究表明:红树植物对汞和镉等重金属元素有较强的富集作用和耐受特性(林鹏等,1989;吴桂容等,2006;杨盛昌等,2003)。但到目前为止,有关红树植物的耐铝特性、铝离子对红树植物的生理伤害等方面的研究还鲜有报道。因此,本文以海莲(*Bruguiera sexangula*)幼苗为材料,通过砂培和不同浓度 Al^{3+} 盐处理,探讨 Al^{3+} 胁迫对红树植物生长和保护酶系统等的影响,为研究红树植物的耐铝特性及其适应机制提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料培养及 Al^{3+} 盐处理

海莲成熟胚轴采于海南省文昌清澜港红树林自然保护区,平均长度为 8.23 ± 1.04 cm、平均重量为 12.2 ± 0.68 g。采用随机分组,将海莲胚轴于厦门大学生命科学学院温室内进行砂培,砂砾粒径 2~4 mm,经自来水反复冲洗后装入塑料网盆中,每盆重约 2.5 kg,每盆种植海莲胚轴 5~6 棵。培养液采用 Hoagland's 液体培养基,并混合 3‰ NaCl 以保证海莲幼苗的生理需盐,每隔 5 d 更换 1 次培养基,每天补充因蒸发损失的水分。1 个月后进行铝胁迫处理,氯化铝 (Al^{3+}) 浓度分别为 10、25、50 mmol/L,以未添加铝盐的培养基作为对照。每一处理重复 4 次,为期 2 个月。

1.2 方 法

1.2.1 采样 采取海莲第 3~4 对叶片和完整根系,经自来水及重蒸水反复清洗,晾干。

1.2.2 酶液的制备 取 1 g 新鲜叶片或根组织,剪碎,分次加入 10 mL 62.5 mmol/L 磷酸缓冲液(PBS pH 为 7.8,含 1% PVP)冰浴研磨,15 000 g,4 °C 离心 20 min,取上清。酶液中的蛋白质含量以 Brandford(1976)考马斯亮蓝 G-250 方法测定,以牛血清蛋白作标准曲线。

1.2.3 过氧化物酶(POD)活性的测定 取 100 μ L

酶液(用 PBS 代替酶液做空白),加入 1.5 mL 反应混和液(62.5 mmol/L, pH 7.8 PBS, 20 mmol/L 愈创木酚),混匀,25 °C 温浴 5 min,加 10 μ L 过氧化氢启动反应于 470 nm 波长处做时间扫描,扫描曲线率为酶反应速率,酶活性以 $\Delta A_{470}/g \cdot Fw \cdot min$ 表示(Jiang 等,2003)。

1.2.4 过氧化物酶(CAT)活性的测定 CAT 活性的测定参考郝再彬等(2004)并略加改进,反应体系为 100 μ L 酶液加 900 μ L 62.5 mmol/L 磷酸缓冲液(含 1% H_2O_2)启动反应,于 240 nm 波长处做时间扫描,扫描曲线率为酶反应速率,酶活性以 $\Delta OD_{240}/g \cdot Fw \cdot min$ 表示。

1.2.5 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定 SOD 的活性采用氮蓝四唑(NBT)光照氧化还原显色反应的方法测定,以每单位时间内抑制光还原 50% 的氮蓝四唑(NBT)为一个酶单位,酶活性以 U/gFw。

1.2.6 抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的测定 以 Nakano & Asada(1981)的方法进行,290 nm 波长处做时间扫描,根据单位时间内 OD_{290} 减少的值,计算 APX 的活性。

1.2.7 丙二醛(MDA)含量测定 取上述上清液 2.0 mL 加入 2.0 mL 10% 三氯乙酸(TCA)(含 0.5% 硫代巴比妥酸钠(TBA))混匀,煮沸 15 min 后快速冷却,4 000 r/min 离心 20 min,以 10% TCA(含 0.5% TBA)为参比,上清液在 532 和 600 nm 波长处测定 OD 值。

1.2.8 游离脯氨酸(Pro)含量的测定 采用郝再彬等(2004)茚三酮显色法,测定植物组织游离脯氨酸含量的变化。

1.2.9 统计方法 用 SPSS 11.0 统计软件处理所有结果,采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)对实验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 对海莲幼苗生长的影响

100 mmol/L 和 75 mmol/L 铝处理的海莲植株,分别在处理 7 d 和 15 d 后停止生长,最终因根系坏死导致植株枯死。在 10~50 mmol/L 铝浓度范围内,海莲幼苗随铝浓度增加,生长明显减慢,与对照组抽条高度 18.4 ± 1.4 cm 相比,分别为 16.2 ± 2.7 cm、 15.4 ± 1.1 cm 和 12.3 ± 1.7 cm。叶片数量和叶面积也相应减少。对根系观察发现,处理组的

根系侧根和根毛较对照组明显减少,且显得酥脆。

2.2 对海莲幼苗叶片和根系丙二醛(MDA)含量的影响

丙二醛(MDA)是脂质过氧化产物,其含量高低

表 1 Al³⁺胁迫对海莲幼苗叶片和根部
丙二醛(MDA)含量的影响

Table 1 Effect of Al³⁺ stress on MDA in leaves
and roots of *Brugiera sexangula* seedlings

铝处理 Al ³⁺ treatment (mmol/L)	叶片 MDA 含量 MDA in leaves (nmol/gFw)	根 MDA 含量 MDA in roots (nmol/gFw)
0	4.716±0.116Aa	1.657±0.124Aa
10	4.699±0.530Aa	1.574±0.211Aa
25	4.620±0.333Aa	2.010±0.375Aa
50	5.987±0.107Bb	3.215±0.433Bb

注:同一栏内字母不同者为差异显著,大小字母分别表示 $P=0.01$ 和 $P=0.05$ 的显著水平。下同。

Note: values in same column followed by different capital or small letter are significantly different at $P=0.01$ or $P=0.05$ level, respectively. The same below.

表 2 Al³⁺胁迫对海莲幼苗叶片和根中 POD 和 CAT 活性的影响

Table 2 Effect of Al³⁺ stress on POD and CAT in leaves and roots of *Brugiera sexangula* seedlings

铝处理 Al ³⁺ treatment (mmol/L)	叶 POD 活性 POD in leaves ($\Delta A_{470}/g \cdot Fw \cdot min$)	叶 CAT 活性 CAT in leaves ($\Delta A_{240}/g \cdot Fw \cdot min$)	根 POD 活性 POD in roots ($\Delta A_{470}/g \cdot Fw \cdot min$)	根 CAT 活性 CAT in roots ($\Delta A_{240}/g \cdot Fw \cdot min$)
0	8.53±0.32Aa	2.73±0.45Aa	5.30±0.68Aa	16.02±1.67Aa
10	10.93±0.51Ab	1.57±0.47Bb	7.33±0.58Aa	11.55±0.49Bb
25	20.77±0.94Bc	1.23±0.31Bb	12.87±2.70Bb	10.34±0.76Bb
50	11.73±0.61Ab	1.15±0.41Bb	20.10±2.92Cc	7.20±0.85Bc

表 3 Al³⁺胁迫对海莲幼苗叶片和根部 SOD 和 APX 活性的影响

Table 3 Effect of Al³⁺ stress on SOD and APX activity in leaves and roots of *Brugiera sexangula* seedlings

铝处理 Al ³⁺ treatment (mmol/L)	叶 SOD 活性 SOD in leaves (U/g · Fw)	根 SOD 活性 SOD in roots (U/g · Fw)	叶 APX 活性 APX in leaves ($\Delta A_{290}/g \cdot Fw \cdot min$)	根 APX 活性 APX in roots ($\Delta A_{290}/g \cdot Fw \cdot min$)
0	118.99±6.3Aa	96.80±4.70Aa	4.87±0.74Aa	9.70±0.15Aa
10	106.51±21.8Aa	113.31±5.14Ab	9.06±1.21Bb	14.50±0.11Bb
25	97.81±11.05Aa	124.88±4.66Bc	10.10±1.01Bb	8.76±0.16Aa
50	85.88±6.13Bb	127.71±9.25Bc	11.42±1.18Bb	9.10±0.1Aa

2.3.2 对 SOD 和 APX 活性的影响 表 3 结果显示,海莲叶片 SOD 活性在 10~50 mmol/L 铝处理下表现降低趋势,但 10 mmol/L、25 mmol/L 两个处理对 SOD 活性影响不显著;铝处理水稻幼苗的研究(石贵玉,2004)中,也发现水稻叶片 SOD 活性随着铝浓度的上升呈下降趋势的类似情况。在 10~50 mmol/L 铝处理下,海莲根中 SOD 的活性均显著增加。海莲叶片的 APX 活性较对照组增加了 0.86~1.34 倍;而海莲根部的 APX 活性除 10 mmol/L

反映了膜质的破损程度。表 1 结果显示,低浓度铝盐处理下,海莲叶片和根的 MDA 含量变化不显著,但随铝浓度增加到 50 mmol/L,叶片和根的 MDA 含量均显著增强,较对照组分别增加了 1.5 倍和 1.9 倍,说明 50 mmol/L 铝浓度引发了海莲叶片和根细胞的膜质过氧化,破坏了脂膜的完整性。

2.3 对海莲幼苗叶片和根部保护酶系统的影响

不同铝浓度处理下,海莲幼苗叶片和根部的某些保护酶活性呈现不同的变化趋势。

2.3.1 对 POD 和 CAT 活性的影响 从表 2 可知,与对照相比,铝盐处理下海莲叶片和根部的 POD 活性显著增强。在根部,随着铝盐浓度增加,POD 活性相应提高,50 mmol/L 处理组较对照组增加 2.8 倍。与对照组相比,海莲叶片和根系的 CAT 活性随铝浓度增加呈现下降趋势,但叶片 CAT 活性在各处理组之间差异并不显著。

浓度处理下有所增加外,其他浓度处理的结果与对照组相比差异不显著。SOD 是植物抵御胁迫伤害,清除活性氧的第一道防线。长期铝胁迫下,海莲叶片的 SOD 活性下降,可能因为 SOD 酶只在一定时间范围内比较活跃,作用持续的时间短;细胞内产生的活性氧可能超出了 SOD 酶的清除范围,活性氧代谢的平衡遭到破坏,产生了一定程度的氧化伤害。而海莲叶片中 APX 活性的增加,可能弥补了 SOD 对膜质过氧化损伤修复作用的减弱趋势。根部

SOD 活性得到增高,表明海莲幼苗可以通过提高根部 SOD 活性来适应铝盐胁迫;而 APX 在海莲根部细胞器中作用并不活跃。

2.4 对海莲幼苗不同部位蛋白质、脯氨酸含量的影响

表 4 结果显示,海莲叶片和根部的可溶性蛋白质含量在 25~50 mmol/L 两个浓度 Al^{3+} 处理下较对照组均显著降低,在铝胁迫对龙眼幼苗蛋白质和核酸含量的影响的研究中(肖祥希等,2006),龙眼叶片和根中可溶性蛋白质总量也随铝浓度的增加呈现降低的变化趋势;对此的解释有:蛋白酶活性升高导致蛋白质水解;逆境胁迫导致活性氧增加,膜脂过氧

化加剧,蛋白质合成受到抑制。

脯氨酸是植物蛋白质的组分之一,以游离状态广泛地存在于植物体中。正常条件下,高等维管植物体中游离脯氨酸的含量并不多,但在逆境条件下(干旱、盐渍、冷冻等)植物体内游离脯氨酸可增加 10~100 倍(张显强等,2004)。

铝胁迫处理导致海莲叶片和根部游离脯氨酸的大量积累,且随着铝处理浓度的增加,脯氨酸含量呈现极显著的递增趋势。海莲叶片脯氨酸含量增加了 7.2~14.4 倍,根部脯氨酸含量增加了 10.7~30.1 倍。

表 4 Al^{3+} 胁迫对海莲幼苗叶片和根部可溶性蛋白和游离脯氨酸含量的影响

Table 4 Effect of Al^{3+} stress on soluble protein and Pro in leaves and roots of *Brugiera sexangula* seedlings

铝处理 Al^{3+} treatment (mmol/L)	叶蛋白质含量 Protein in leaves (mg/g·Fw)	根蛋白质含量 Protein in roots (mg/g·Fw)	叶 Pro 含量 Pro in leaves (μ g/g·Fw)	根 Pro 含量 Pro in roots (μ g/g·Fw)
0	9.27±0.28Aa	8.54±0.64Aa	21.3±7.83Aa	13.6±1.7Aa
10	9.03±0.86Aa	8.42±0.22Aa	34.12±8.55Aa	36.97±2.4Aa
25	6.24±1.01Bb	5.52±0.14Bb	174.72±7.83Bb	159.26±14.5Bb
50	5.42±0.46Bb	4.96±0.21Bb	328.28±3.56Cc	422.8±19.49Cc

3 讨论

当 Al^{3+} 盐浓度在 50 mmol/L 时,海莲幼苗能够生长存活,说明海莲对 Al^{3+} 盐有很强的耐受性。但当浓度大于 50 mmol/L 时,海莲生长受到严重抑制,并发生枯死。

海莲叶片和根的 MDA 含量在 10~25 mmol/L Al^{3+} 浓度处理时变化不显著,当浓度达到 50 mmol/L 时,MDA 含量在叶片和根两个部位均显著增加,说明高浓度的铝盐使细胞膜脂过氧化作用增强,细胞膜的结构和功能受到破坏。

在海莲叶片的活性氧清除系统中,各种保护酶与抗坏血酸(AsA)和谷胱甘肽(GSH)等叶绿体中的重要抗氧化剂协调作用。APX 是叶绿体中专一地清除 H_2O_2 的关键酶,与谷胱甘肽还原酶(GR)等酶协同作用,通过抗坏血酸-谷胱甘肽循环移去叶绿体中的 H_2O_2 ,同时使 AsA 和 GSH 再生(肖祥希等,2003)。铝胁迫下,海莲叶片 APX 活性呈显著增加的趋势,可能是叶绿体系统对铝胁迫的适应。

CAT 和 POD 也是植物体内清除 H_2O_2 的主要保护酶,在铝胁迫下,海莲叶片的 CAT 活性显著下降,引起了 H_2O_2 的积累,但由于 POD 活性显著增强,加剧了 H_2O_2 的降解,从而降低细胞内的 H_2O_2

的水平。在 50 mmol/L 铝盐处理时,POD 的活性有所下降,可能是由于叶片积累了较多的铝而抑制了 POD 的活性。

此外,SOD 作为活性氧清除系统中的第一道防线,与其他保护酶协调作用,有效控制细胞内活性氧水平,阻止脂质过氧化物的积累。在高铝浓度下,海莲叶片的 SOD 活性降低,表明铝胁迫抑制了 SOD 活性,这也可能是导致膜脂过氧化程度加深的原因之一。

根系是植物面对土壤铝胁迫的首要器官,其生理代谢功能直接决定了植物对铝胁迫的耐受程度。但有关根系保护酶系统的特性研究相对较少。在本研究中,海莲根部的保护酶系统的活性变化与叶片有些不同:随铝处理浓度的增加,根 POD 和 SOD 活性显著增强,但 APX 的活性变化并不明显。根系 POD 和 SOD 活性的增强,表明根系保护酶系统的防御能力增强,对活性氧的清除作用更为活跃。究其原因,可能与铝胁迫因子诱导了根系 POD 和 SOD 酶基因的大量表达有关。另一种可能是,在铝胁迫条件下,根系能合成包括有机酸在内的特殊物质,这些物质的存在有助于稳定根系 POD 和 SOD 酶基因的转录产物或者促进了酶活力提高。因此,从保护酶系统的变化来看,红树植物根系和叶片可能存在不同的铝胁迫适应机制。

铝胁迫导致海莲幼苗叶片和根部蛋白质含量下降,这与高盐浓度培养海莲(郑海雷等,1998),随着盐分的增加,幼叶的蛋白质含量在总体上呈下降的趋势的结果相似。铝胁迫下蛋白质含量下降的主要原因目前认为有:植物为了适应和抵御胁迫,提高了蛋白酶的活性,从而加剧了蛋白质的水解;胁迫条件下植物细胞内 RNA、DNA 的含量减少,降低了蛋白质的合成速率;逆境胁迫导致活性氧增加,膜脂过氧化加剧(肖祥希等,2003),抑制蛋白质合成。

脯氨酸作为一种重要的渗透保护物质,在植物的抗性生理中发挥着重要的作用。最近有关脯氨酸合成和代谢的研究表明了脯氨酸具有多种功能,即脯氨酸可作为一种迅速利用的能源,氮源和碳源(张显强等,2004)。此外,脯氨酸代谢中间产物具有诱导基因表达作用(Iyer 等,1998)及降低渗透胁迫所造成的氧伤害作用。

从海莲叶片和根部的游离脯氨酸积累情况看,铝胁迫下,两个部位的游离脯氨酸含量均随铝浓度的增加有显著增加。但是,作为渗透胁迫的有机渗透物质积累,脯氨酸含量变化与铝胁迫是否直接相关还存在很多争议,仍需要进一步验证。

参考文献:

- 林鹏,陈荣华. 1989. 九龙江口红树林对汞的循环和净化作用[J]. 海洋学报,11(2):242-247
- 郝再彬,苍晶,徐仲. 2004. 《植物生理实验》[M]. 哈尔滨工业大学出版社
- Cao HF(曹洪法),Gao JX(高吉喜),Shu JM(舒俭民). 1992. Study on the response of *Pinus massoniana* seedling to aluminum (铝对马尾松幼苗影响的研究)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报),12(3):239-246
- Darko E, Ambrus H. 2004. Aluminum toxicity, Al tolerance and oxidative stress in an Al-sensitive wheat genotype and in Al-tolerant lines developed by *in vitro* microspore selection[J]. *Plant Sci*,166:583-591
- Iyer S, Caplan A. 1998. Products of proline catabolism can induce osmotically regulated genes in rice[J]. *Plant Physiol*,116:203-211
- Jiang M, Zhang J. 2003. Cross-talk between calcium and reactive oxygen species originated from NADPH oxidase in abscisic acid-induced antioxidant defence in leaves of maize seedlings[J]. *Plant Cell Environ*,26:929-939
- Kong FX(孔繁翔),Sang WL(桑伟莲),Jiang X(蒋新), et al. 2000. Aluminum toxicity and tolerance in plants(铝对植物毒害及植物抗铝作用机理)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报),20(5):855-862
- Lu JL(陆建良),Liang YR(梁月荣). 1997. Effect of aluminium stress on superoxide dismutase in tea and other plants(铝对茶树等植物超氧化物歧化酶的影响)[J]. *J Tea Sci*(茶叶科学),17:197-200
- Ma JF, Shen RF. 2002. Response of rice to Al stress and identification of quantitative trait loci for Al tolerance[J]. *Plant Cell Physiol*,43(6):652-659
- Nakano Y, Asada K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant Cell Physiol*,22:867-880
- Shi GY(石贵玉). 2004. Effect of aluminium on growth and some physiological function of rice seedlings(铝对水稻幼苗生长和生理的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物),24(1):77-80
- Wang F(王芳),Liu P(刘鹏),Xu GD(徐根娣), et al. 2006. Effects of aluminium amount in soil on the root growth of buckwheat(铝对荞麦根系的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物),26(3):321-324
- Wu GR(吴桂容),Yan CL(严重玲). 2006. Effects of Cd on the growth and osmotic adjustment regulation contents of *Aegiceras conrniculatum* seedlings(镉对桐花树幼苗生长及渗透调节的影响)[J]. *Ecol Environ*(生态环境),15(5):1 003-1 008
- Xiao XX(肖祥希),Yang ZW(杨宗武),Xiao H(肖晖), et al. 2003. Effect of aluminum stress on active oxygen metabolism and membrane system of Longan(*Dimocarpus longan*) leaves(铝胁迫对龙眼叶片活性氧代谢及膜系统的影响)[J]. *Sci Silv Sin*(林业科学),39:52-57
- Xiao XX(肖祥希),Liu XH(刘星辉),Yang ZW(杨宗武), et al. 2006. Effect of aluminum stress on the content of protein and nucleic acid of longan (*Dimocarpus longan*) seedlings(铝胁迫对龙眼幼苗蛋白质和核酸含量的影响)[J]. *Sci Silv Sin*(林业科学),42(10):24-30
- Yang SC(杨盛昌),Wu Q(吴琦). 2003. Effect of Cd on growth and physiological characteristics of *Aegiceras conrniculatum* seedlings(Cd对桐花树幼苗生长及某些生理特性的影响)[J]. *Marine Environ Sci*(海洋环境科学),22(1):38-42
- Zhang XQ(张显强),Luo ZQ(罗在柒),Tang JG(唐金刚). 2004. Effect of high temperature and drought stress on free proline content and soluble sugar content of *Taxiphyllum taxiramium*(高温和干旱胁迫对鳞叶蕨游离脯氨酸和可溶性糖含量的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物),24(6):570-573
- Zheng HL(郑海雷),Lin P(林鹏). 1998. Effect of salinity on membrane protection system for *B. sexangula* and *B. gymnorhiza* seedling(培养盐度对海莲和木榄幼苗膜保护系统的影响)[J]. *J Xiamen Univ(Nat Sci)*(厦门大学学报·自然科学版),37(2):278-282