

坛紫菜对干出和酸雨胁迫的生理响应

万文琴, 杜 响, 秦 欣, 骆其君*

(宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 以坛紫菜为试验材料, 研究不同强度酸雨(pH 值分别为 5.6、4.5、4.0、3.5)对坛紫菜生理特性的影响. 试验中测定了坛紫菜细胞膜透性、抗氧化酶活性及叶绿素荧光参数等生理指标, 以比较适当干出和完全浸泡、黑暗和光照条件下酸雨胁迫对坛紫菜生理特性的影响. 结果表明: (1) 经过不同方式处理的模拟酸雨处理后, 适当干出处理的坛紫菜对酸雨的耐受性大于完全浸泡, 黑暗处理的坛紫菜对酸雨的耐受性大于光照; (2) 坛紫菜的各项生理指标受 pH 值为 3.5 的酸雨胁迫的影响最显著, 而坛紫菜对 pH 值为 5.6 的酸雨胁迫表现出一定的耐受性. 该试验为酸雨胁迫下的坛紫菜栽培管理提供技术依据.

关键词: 坛紫菜; 模拟酸雨; 生理指标; 干出

中图分类号: S-3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 02-0001-07

酸雨通常是指 pH 值小于 5.6 的雨水、冻雨、雪、雹、露等大气降水, 它是因人类活动或自然灾害等原因导致区域降水酸化的一种污染现象^[1]. 目前, 我国酸雨问题极其严重, 已成为继欧洲和北美之后的世界三大酸雨区之一^[2]. 浙江沿海是坛紫菜的主产区, 随着工业化的发展, 因煤炭消费量、机动车辆等迅猛增加, 浙江省已有 90% 以上的国土面积被酸雨覆盖, 其中重酸雨区高达 20%, 且年均降水 pH 值呈不断下降趋势^[3]. 酸雨会对植物的生理生态产生一定程度的伤害, 如酸雨会腐蚀植物的叶片, 导致光合系统损伤, 光合作用被抑制^[4]; 植物体内的自由基增多, 导致抗氧化酶活性下降^[5]. 刘华等^[6]研究了模拟酸雨胁迫对金鱼藻伤害的作用机理, 发现随着 pH 降低, 金鱼藻的细胞膜透性增加. 李信书等^[7]探讨了条斑紫菜在干燥和酸雨胁迫时光系统II(PSII)的最大光化学量子产量(F_v/F_m)的变化, 发现其 F_v/F_m 随 pH 降低和时间延长而降低. 陈兆虹等^[8]发现 pH 值 4 和 5 会使坛紫菜光合作用和呼吸作用速率下降, 导致坛紫菜叶状体的死亡.

坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)是我国主要的一种可人工栽培的海藻^[9], 其养殖范围广泛, 浙江、

福建等省都有大面积养殖, 具有极高的经济价值和生态价值^[10]. 目前, 浙江沿海地区的坛紫菜养殖以插杆式养殖为主, 网帘可随潮水的涨落或人为的控制而升降, 从而使坛紫菜周期性地干出在空气中或浸没在海水里. 一旦处于干出状态, 坛紫菜还会遭遇盐度、强光、酸雨等不利环境因子的胁迫. 且干出时如果遭遇酸雨的胁迫, 坛紫菜生长环境的 pH 降低, 因此会损害藻体的生长. 光是影响植物生长、存活、分布和更新的重要生态因子^[11], 光照是植物生长的必要条件^[12]. 在干出或浸没在海水中, 以及黑暗或光照情况下, 酸雨影响是否有差异, 对于养殖管理具有重要意义. 因此本文以坛紫菜为试验材料, 比较光照与黑暗以及干出与浸没条件下, 酸雨胁迫对坛紫菜生理特性的影响, 为酸雨胁迫下的坛紫菜栽培管理提供技术依据.

1 材料与方法

1.1 材料

坛紫菜“浙东 1 号”叶状体于 2019 年 10 月采自浙江省宁波市象山县鹤浦紫菜养殖区(N29°06'04.37", E121°54'14.26"). 采集后洗净、阴干(脱水率

收稿日期: 2021-03-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal1g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFT0901502); 现代农业产业技术体系专项资金(CARS-50).

第一作者: 万文琴(1995-), 女, 江西南昌人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 藻类生理生化分析. E-mail: wanwenqin1014@163.com

*通信作者: 骆其君(1965-), 男, 浙江宁海人, 教授, 主要研究方向: 水产养殖. E-mail: luojijun@nbu.edu.cn

为 65.74%), 密封保存于 -24°C 冰箱中备用。

1.2 仪器

GXZ 型智能光照培养箱(宁波江南仪器厂), WATER-PAM 叶绿素荧光仪(德国 Walz 公司), 3001 酶标仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司), 1-16K 离心机(德国 Sigma 公司), PHS-3E 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司), DDS-307A 型电导率仪(上海硕光电子科技有限公司)。

1.3 方法

根据浙江省自然降水情况, 将硫酸与硝酸按 8:1(体积比)配制成母液^[13-14], 用蒸馏水稀释成 4 个梯度酸性水溶液, pH 值分别设定为 5.6、4.5、4.0 和 3.5。

1.3.1 干出、浸泡时模拟酸雨胁迫对生理特性的影响

取坛紫菜新鲜组织, 用滤纸吸干其表面水分, 放入盛有 40 mL 模拟酸雨(pH 5.6、4.5、4.0、3.5)的培养皿中分别处理 5 min、15 min、30 min、1 h、2 h、4 h、6 h; 将坛紫菜新鲜组织预先干出 24 h 后, 放入盛有模拟酸雨的培养皿中, 分别处理 5 min、15 min、30 min、1 h、2 h、3 h, 其中每浸没 1 次, 则干出 30 min。以自然海水(盐度 25, pH 8.0)作为对照, 试验设置 3 组重复, 培养温度为 25°C , 光强为 2 000 lx。

1.3.2 光照、黑暗时模拟酸雨胁迫对生理特性影响

分别在光照(光强 2 000 lx)、黑暗条件下, 取坛紫菜新鲜组织, 用滤纸吸干其表面水分, 放入盛有 40 mL 模拟酸雨(pH 5.6、4.5、4.0 和 3.5)的培养皿中分别处理 5 min、15 min、30 min、1 h、2 h、4 h、6 h。以自然海水(盐度 25, pH 8.0)作为对照, 试验设置 3 组重复, 培养温度为 25°C 。

1.4 生理指标和光合参数的测定

1.4.1 叶绿素荧光参数测定

取坛紫菜叶状体, 进行暗处理 15 min, 使用 WATER-PAM 测定叶绿素荧光诱导曲线, 记录 PSII 的 F_v/F_m 值。

1.4.2 细胞渗透性测定

参照文献[15]的方法, 用 DDS-307A 型电导率仪测定电导率。

1.4.3 抗氧化酶活性测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参考文献[16]的方法; 过氧化物酶(POD)活性测定参考文献[15]

等的方法, 采用愈创木酚法。

1.5 数据处理分析

采用 Microsoft Excel 2019 整理数据, 并使用 SPSS 25.0 进行数据分析, Origin 2018 进行绘图。用单因素方差分析, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著性判别依据。

2 结果与分析

2.1 干出、浸泡时, 模拟酸雨胁迫对坛紫菜生理特性的影响

2.1.1 完全浸泡时, 模拟酸雨胁迫对坛紫菜生理特性的影响

(1)浸泡时, 模拟酸雨对坛紫菜 F_v/F_m 的影响。随着模拟酸雨 pH 值的降低及处理时间的延长, 坛紫菜 F_v/F_m 总体呈下降趋势(图 1)。与对照组相比, pH 5.6 酸雨处理 5 min 后已显著降低($P < 0.05$), 为 0.632 5; pH 3.5 酸雨处理组存在极显著差异($P < 0.01$), 且模拟酸雨 pH 3.5 处理 6 h 的 F_v/F_m 值最小, 为 0.008, 几乎趋近于 0。

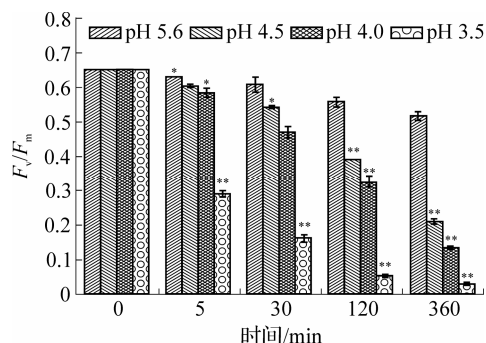


图 1 酸雨完全浸泡对坛紫菜 F_v/F_m 的影响

(2)浸泡时, 模拟酸雨对坛紫菜细胞渗透性的影响。酸度与坛紫菜叶状体膜透性呈正相关, pH 值越低, 坛紫菜叶状体相对电导率越大, 且随着酸胁迫时间增长, 其膜透性也变大(图 2)。不同模拟酸雨处理的相对电导率均高于对照, 且 pH 3.5 处理 6 h 的相对电导率最大, 为 93.15%, 与对照组存在极显著差异($P < 0.01$)。

(3)浸泡时, 模拟酸雨对坛紫菜抗氧化酶活性影响。随模拟酸雨 pH 值降低, 坛紫菜 POD 活力总体呈下降趋势(图 3)。与对照组相比, 经不同强度酸雨处理后, 坛紫菜 POD 活力均显著降低($P < 0.05$), 且在 pH 3.5 处理 30 min 时数值最小($132.07 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$)。

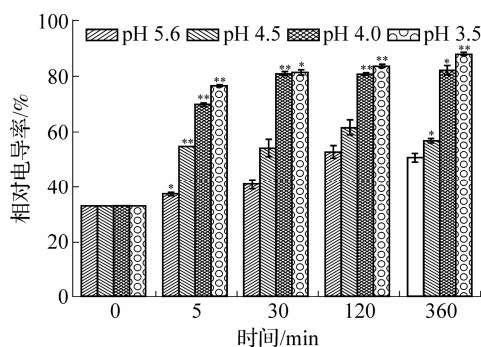


图2 酸雨完全浸泡对坛紫菜相对电导率的影响

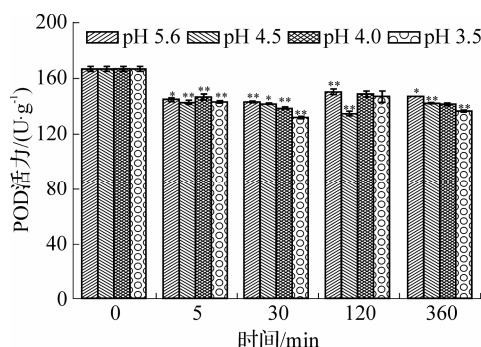


图3 酸雨完全浸泡对坛紫菜 POD 活性的影响

随着模拟酸雨 pH 值的降低, 坛紫菜 SOD 活力总体呈下降趋势(图 4). 随着胁迫时间延长, pH 5.6 处理均显著高于对照组($P < 0.05$), 且在处理 30 min 时达到最大, 为 $7053.59 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$, 是对照组的 1.15 倍; 同样情况, 随着胁迫时间的延长, pH 4.5 处理与对照差异不显著($P > 0.05$), pH 4.0 处理均显著低于对照组($P < 0.05$), 且在模拟酸雨处理 30 min 时最小, 为 $5062.71 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$.

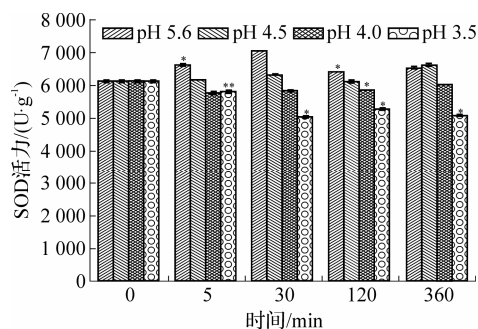
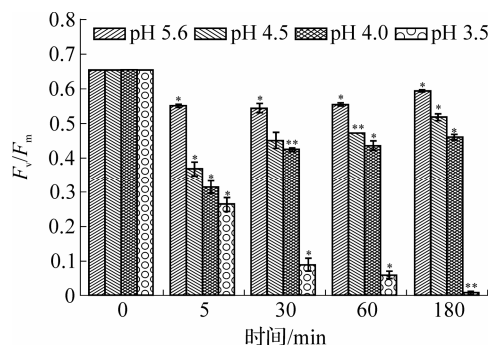


图4 酸雨完全浸泡对坛紫菜 SOD 活性的影响

2.1.2 干出时, 模拟酸雨胁迫对坛紫菜生理特性的影响

(1)干出时, 模拟酸雨对坛紫菜 F_v/F_m 的影响. 进行适当干出时, 随着模拟酸雨 pH 值的降低, 坛紫菜 F_v/F_m 总体呈下降趋势, 且各处理组的变化幅

度不同(图 5). pH 5.6、4.5 和 4.0 处理虽均显著低于对照组($P < 0.05$), 但随着酸雨胁迫和干出时间的延长, 坛紫菜 F_v/F_m 呈上升趋势. 而 pH 3.5 处理组的 F_v/F_m 随着酸雨和干出处理时间的延长而降低, 且在酸雨胁迫 3 h、干出 3 h 时最低, 为 0.031, 几乎趋近于 0.

图5 适当干出时, 酸雨对坛紫菜 F_v/F_m 的影响

(2)干出时, 模拟酸雨对坛紫菜细胞渗透性的影响. 随着模拟酸雨 pH 值的减小, 各处理组坛紫菜相对电导率呈逐渐上升趋势, 且增加幅度不同(图 6). 随着处理时间的延长, pH 5.6 处理与对照差异不显著($P > 0.05$), 而 pH 4.0、3.5 处理均显著高于对照组($P < 0.05$), 且在 pH 3.5 酸雨胁迫 3 h、干出 3 h 时达到最大(86.43%), 是对照的 2.60 倍.

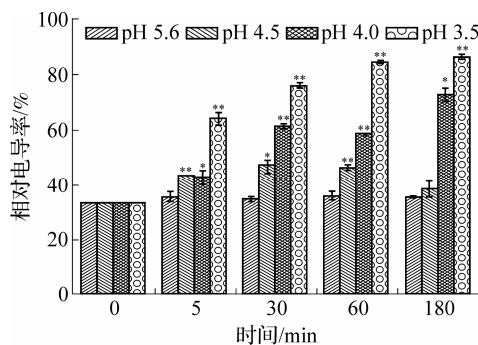


图6 适当干出时, 酸雨对坛紫菜相对电导率的影响

(3)干出时, 模拟酸雨对坛紫菜抗氧化酶活性的影响. 随着模拟酸雨 pH 值的减小, pH 值分别为 5.6、4.5 和 4.0 的酸雨胁迫下, 坛紫菜的 POD 活性总体呈上升趋势, 而 pH 3.5 处理呈下降趋势(图 7). 坛紫菜 POD 活性在 pH 4.0 酸雨胁迫 30 min、干出 1 h 时达到最高($172.33 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$), 是对照组 1.03 倍. 与对照组相比, pH 3.5 酸雨处理的坛紫菜 POD 活性显著降低($P < 0.05$).

干出时, 模拟酸雨处理在不同时期, pH 值分别

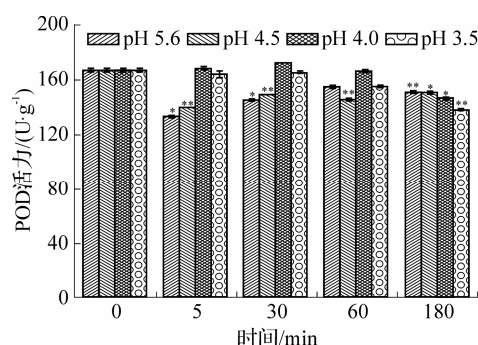


图7 适当干出时, 酸雨对坛紫菜 POD 活性的影响

为 5.6、4.5 和 4.0 的酸雨胁迫下, 坛紫菜的 SOD 活性均极显著高于对照组($P<0.01$), 而 pH 值为 3.5 的酸雨胁迫下, 坛紫菜的 SOD 活性均显著低于对照组($P<0.05$)(图 8)。随着模拟酸雨 pH 值的减小, 坛紫菜 SOD 活性呈逐渐下降趋势, 且下降幅度不同, 在 pH 3.5 酸雨胁迫 5 min 时最低($5\,634.59\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$), 比对照下降了 8.32%。pH 3.5 处理虽均低于对照组, 但随酸雨和干出处理时间的延长, 坛紫菜 SOD 活性有所上升。

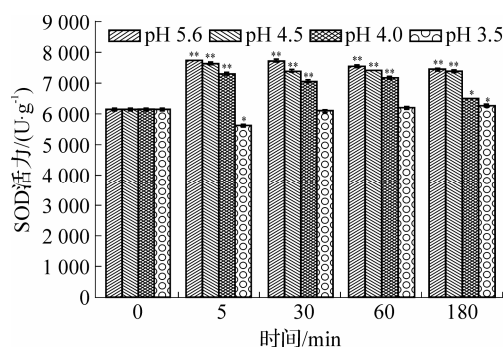


图8 适当干出时, 酸雨对坛紫菜 SOD 活性的影响

2.1.3 比较干出、浸泡时, 酸雨胁迫对坛紫菜生理特性的影响

从表 1 可知, 处理 6 h 时, 完全浸泡和适当干出处理的坛紫菜 F_v/F_m 均随酸度的降低而下降, 且

幅度有差异。与对照组相比, pH 值分别为 4.5、4.0 和 3.5 的完全浸泡酸雨胁迫下, 坛紫菜 F_v/F_m 差异极显著($P<0.01$), 其降幅分别为 67.69%、78.46%和 98.46%, 而 pH 值分别为 4.5、4.0 和 3.5 的适当干出酸雨胁迫下, 降幅为 20.00%、29.23%和 95.38%, 明显小于完全浸泡酸雨胁迫组。

处理 6 h 时, 随着模拟酸雨 pH 值的减小, 完全浸泡和适当干出处理的坛紫菜相对电导率均呈上升趋势, 且幅度有差异。pH 值分别为 4.5 和 4.0 的完全浸泡酸雨胁迫下, 坛紫菜相对电导率与对照组差异显著($P<0.05$), pH 值为 3.5 的差异极显著($P<0.01$), 其增幅分别为 71.88%、147.96%和 166.02%, 而 pH 值分别为 4.5、4.0 和 3.5 的适当干出酸雨胁迫下的增幅为 15.39%、118.79%和 159.94%, 明显小于完全浸泡酸雨胁迫处理。

处理 6 h 时, 随着模拟酸雨 pH 值的减小, 完全浸泡和适当干出处理的坛紫菜 POD 活性均呈下降趋势, 且均与对照存在显著差异($P<0.05$), 但下降幅度不同。与对照组相比, 适当干出酸雨胁迫下的坛紫菜 POD 活性的降幅分别为 9.51%(pH 5.6)、9.94%(pH 4.5)、12.43%(pH 4.0)和 17.26%(pH 3.5), 而完全浸泡处理下的降幅分别为 11.71%、14.77%、15.29%和 18.12%, 明显高于适当干出处理。

处理 6 h 时, 与对照组相比, pH 值分别为 5.6 和 4.5 的适当干出酸雨胁迫下的坛紫菜 SOD 活性差异极显著($P<0.01$), pH 4.0 处理差异显著($P<0.05$), 其增幅分别为 20.90%、20%和 5.25%, 而 pH 值分别为 5.6 和 4.5 的完全浸泡酸雨胁迫下的增幅为 6.42%和 7.92%, 明显小于适当干出酸雨胁迫处理, 同时 pH 4.0 和 3.5 处理的 SOD 活性均低于适当干出酸雨胁迫。此试验结果说明适当干出处理的坛紫菜对酸雨耐受性远大于完全浸泡在酸雨条件下,

表 1 2 种方式处理 6 h 时, 酸雨胁迫对坛紫菜生理指标的影响

模拟酸雨 pH 值	F_v/F_m		相对电导率/%		POD 活性		SOD 活性/($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	
	完全浸泡	适当干出	完全浸泡	适当干出	完全浸泡	适当干出	完全浸泡	适当干出
对照组	0.65±0.01		0.33±0.01		167.33±1.41		6 145.95±28.12	
5.6	0.52±0.01	0.59±0.00*	50.95±0.01	35.57±0.02	147.75±0.12*	151.40±0.38**	6 540.48±20.52*	7 430.76±26.80**
4.5	0.21±0.01**	0.52±0.01*	57.15±0.01*	38.37±0.03	142.67±0.12*	150.71±0.88*	6 632.84±51.31	7 375.18±21.45**
4.0	0.14±0.01**	0.46±0.01*	82.45±0.02*	72.75±0.03*	141.73±0.40	146.54±1.38*	6 037.63±41.89	6 468.61±13.14*
3.5	0.01±0.01**	0.03±0.00**	88.45±0.01**	86.43±0.01**	137.07±0.40*	138.47±0.40**	5 083.24±20.52*	6 254.01±24.77*

注: *与**表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

即适当干出将减轻对酸雨胁迫所引发的影响。

2.2 比较光照、黑暗时, 模拟酸雨胁迫对坛紫菜生理特性的影响

2.2.1 模拟酸雨对坛紫菜细胞渗透性的影响

如图9所示, 酸雨胁迫6h时, 2种处理条件下的酸度与坛紫菜叶状体膜透性呈正相关, pH值越低, 坛紫菜叶状体相对电导率越大。与对照组相比, 光照条件下pH值分别为4.0和3.5的酸雨胁迫下, 坛紫菜相对电导率差异极显著($P<0.01$), pH4.5处理组差异显著($P<0.05$), 其上升幅度为71.88%(pH4.5)、147.97%(pH4.0)和166.02%(pH3.5), 而黑暗条件下pH值分别为4.5、4.0和3.5酸雨胁迫下的增幅为49.85%、95.09%和137.56%, 明显小于光照处理组, 且黑暗条件下各处理组的相对电导率均小于光照条件下。由此可见, 酸性越强, 坛紫菜相对电导率越大, 则膜透性越大。因此光照和黑暗酸雨胁迫下, 坛紫菜的细胞膜结构都受到一定程度的影响, 但黑暗条件下, 酸雨对坛紫菜伤害较轻。

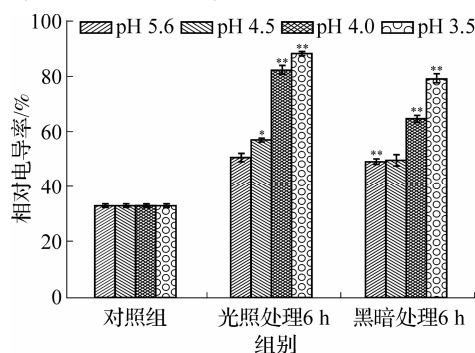


图9 光照、黑暗处理时酸雨对坛紫菜相对电导率的影响

2.2.2 模拟酸雨对坛紫菜抗氧化酶活性的影响

如图10所示, 酸雨胁迫6h时, 随着模拟酸雨pH值的减小, 光照处理下的坛紫菜POD活性总体呈下降趋势, 而黑暗处理下的总体呈上升趋势。经

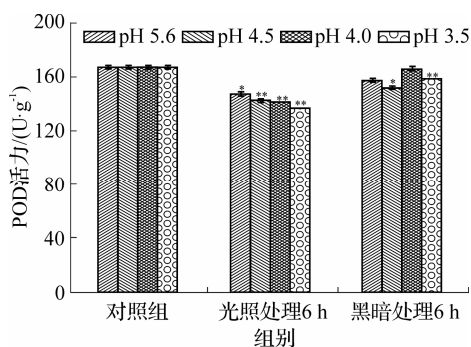


图10 光照、黑暗处理时酸雨对坛紫菜 POD 活性的影响

不同强度的酸雨处理后, 光照和黑暗下的坛紫菜POD活力均显著低于对照组($P<0.05$), 但黑暗条件下各处理的POD活力均高于光照。

如图11所示, 酸雨胁迫6h时, 随着模拟酸雨pH值的减小, 光照和黑暗处理下的坛紫菜SOD活力均呈先上升后下降趋势, 但黑暗条件下各处理组的SOD活力均高于光照。与对照组相比, 黑暗条件下pH值分别为5.6和4.5的酸雨胁迫下, 坛紫菜SOD活力极显著增大($P<0.01$), 其增幅为7.79%和9.06%, 而光照条件pH值分别为5.6和4.5的酸雨胁迫下的增幅为6.42%和7.92%, 均小于黑暗处理组。与对照组相比, 光照条件下pH值分别为4.0和3.5的酸雨胁迫下, 坛紫菜SOD活力显著减小($P<0.05$), 其降幅为1.76%和17.29%, 而黑暗条件下pH值分别为4.0和3.5的酸雨胁迫下的降幅为0.07%和9.79%, 均小于光照处理组。此试验结果说明黑暗条件下, 坛紫菜SOD清除自由基的能力强于光照处理组。

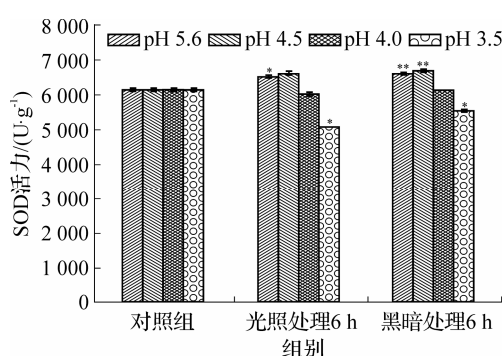


图11 光照、黑暗处理时酸雨对坛紫菜 SOD 活性的影响

3 讨论

研究表明, 植物生长在逆境中会使PSII活性下降, 严重时还会产生光破坏作用, 导致植物死亡^[17], 而叶绿素荧光分析技术能有效地测定和诊断植物活体在逆境中的光合生理状况^[18]。最大光化学量子产量(F_v/F_m)是荧光分析中最常用的参数, 它是PSII的光化学效率, 能反映植物在逆境中受胁迫的情况^[19]。本试验结果表明, 坛紫菜 F_v/F_m 随着酸雨pH值的减小而下降, 这与胡晓梅^[20]研究结果一致。与对照组相比, pH5.6处理无明显差异($P>0.05$), 而其他处理则差异显著($P<0.05$), 说明轻度酸雨对坛紫菜的光合作用未产生显著影响($P>0.05$), 而中

度和重度酸雨均产生显著影响($P<0.05$).

酸雨对植物的影响机理是使植物自由基代谢平衡失调, 自由基大量积累, 从而导致生物膜系统的损伤, 以及膜保护酶活性和膜保护物质含量的降低^[21]. 本试验研究结果表明, 坛紫菜在酸雨胁迫下, 随着酸度增高和处理时间的延长, 细胞渗透性显著升高($P<0.05$), 尤其在 pH 4.0 和 3.5 处理的质膜透性升高, 达到极显著水平($P<0.01$), 这说明重度酸雨胁迫对坛紫菜的细胞膜系统产生了严重程度的破坏, 进而可能会影响叶状体光合系统的电子传递效率, 抑制叶状体的光合作用.

SOD 是植物抗氧化系统中的首道防线, 能特异性清除 O_2^- , 并将 O_2 转化为 H_2O_2 , 过量的 H_2O_2 能被 POD 分解, 使逆境胁迫导致的过氧化伤害得到缓解. 张利霞等^[22]发现随酸雨酸度的增高, 夏枯草幼苗叶片 SOD 活性呈先升高后下降趋势. 本试验研究结果与之类似, 与对照组相比, 坛紫菜 SOD 活性也随 pH 值的减小呈先上升后下降的趋势, 但 POD 活性呈下降趋势. 酸雨胁迫初期, 由于坛紫菜 SOD 活性升高, 清除自由基的能力增强, 减少了 O_2^- 的积累, 降低了逆境胁迫对细胞膜系统的氧化伤害. 随着酸雨胁迫时间的延长, 仅依靠 SOD 活性的增加可能不足以完全清除活性氧带来的危害, 植物体内活性氧生产能力大于清除能力, 自由基大量积累, 引起细胞膜脂过氧化^[23]. 酸雨降低膜保护酶活性的原因可能是酸雨使植物叶片细胞内环境 pH 值和原生质等电点降低, 使酶活性偏离最适 pH 值, 同时改变了酶的带电性质和底物电离状况, 或破坏了酶结构, 使酶活性钝化^[24].

通常情况下, 单一的胁迫是不存在的. 坛紫菜处于干出状态时, 也会遭遇酸雨的胁迫, 因此本试验模拟了在坛紫菜遭遇酸雨时对其适当干出的情况. 研究结果表明, 完全浸泡酸雨处理的坛紫菜 F_v/F_m 随着模拟酸雨 pH 值的降低及处理时间的延长而降低, 而适当干出酸雨处理 5 min 组坛紫菜 F_v/F_m 较低, 但随着处理时间的延长, pH 5.6、4.5 和 4.0 处理又有所上升, 说明试验初期中的坛紫菜叶状体由于受到酸雨和干出的双重胁迫, 其 PSII 的光能转换效率下降, 试验后期, 叶状体 PSII 系统得到一定程度的恢复, 叶状体的 F_v/F_m 又开始逐渐上升. 同时适当干出酸雨胁迫各处理组的相对电导率与

对照组间的增幅度均小于完全浸泡, 抗氧化酶活性也均大于完全浸泡. 说明适当干出下的坛紫菜对酸雨的耐受性强于完全浸泡在酸雨中, 原因可能是因为坛紫菜处于干出状态时, 由于其自身具有黏性和亲水性, 叶状体表面会覆盖一层水膜, 短时间内这层水膜不会被破坏^[25], 对坛紫菜起到一种保护的作用. 因此, 在坛紫菜生产实践中, 可以通过缩短吊绳的长度来提高网帘高度, 实现人工干出或将栽培的潮位向岸基移动, 提高潮位, 以增加干出时间, 从而减轻酸雨等不利环境的影响或危害, 尤其是在面临较大强度的连续酸雨时. 另外, 本试验也模拟了坛紫菜分别在光照和黑暗下遭遇酸雨的情况, 结果表明黑暗条件下的坛紫菜对酸雨的耐受性较强, 这可能与坛紫菜细胞壁在白天合成、晚上积累有关, 使坛紫菜在黑暗条件下的细胞壁更厚, 对酸雨有一定的抵御性.

4 结论

不同条件下处理的酸雨胁迫对坛紫菜叶状体的叶绿素荧光参数、细胞渗透性和抗氧化酶活性均产生了不同程度的影响. 坛紫菜在适当干出和完全浸泡时, 对酸雨的耐受性为干出大于浸泡, 在光照、黑暗时对酸雨胁迫的耐受性为黑暗大于光照, 且坛紫菜对轻度酸雨(pH 5.6)有一定耐受性.

参考文献:

- [1] 于长毅. 酸雨的形成、危害及防治[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(9):42-44; 47.
- [2] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5):527-532.
- [3] 张慧玲. 浙江省酸雨现状、成因及防治对策研究[J]. 绿色科技, 2015(5):191-192.
- [4] Momen B, Helms J A, Criddle R S. Foliar metabolic heat rate of seedlings and mature trees of *Pinus ponderosa* exposed to acid rain and ozone[J]. Plant, Cell & Environment, 1996, 19(6):747-753.
- [5] 曹春信, 周琴, 韩亮亮, 等. 模拟酸雨对油菜花期生理特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2057-2062.
- [6] 刘华, 吴国荣, 周耀民, 等. 模拟酸雨引起水体 pH 下降导致 Zn 对金鱼藻的毒害[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4):525-529.
- [7] 李信书, 徐军田, 何培民. 干燥和模拟酸雨胁迫对条斑紫菜光合作用的影响[J]. 水产科学, 2011, 30(5):260-

- 264.
- [8] 陈虹兆, 许凯, 王文磊, 等. 大型海藻坛紫菜叶状体的光合作用和 CO₂ 浓缩机制对 pH 剧变的响应[C]//2017 年中国水产学会学术年会论文摘要集. 南昌, 2017:17.
- [9] 俞辰泽, 骆其君, 余贝, 等. 一种坛紫菜叶状体测定新方法研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(3):19-23.
- [10] 刘方方, 骆其君, 陈海敏, 等. 琼胶寡糖对坛紫菜抗烂性的诱导效应[J]. 宁波大学学报(理工版), 2014, 27(4):12-15.
- [11] 王立竹, 张明如, 许焱, 等. 模拟酸雨和光强交互作用对芒莢光合生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(10): 86-94.
- [12] 蔡逸洵, 温嘉怡, 邹定辉. 干出状态下坛紫菜叶状体表面水膜与失水对光合作用光化学特性的影响[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(1): 82-90.
- [13] 齐泽民, 钟章成. 模拟酸雨对杜仲光合生理及生长的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2006, 31(2): 151-156.
- [14] 徐德才. 酸雨污染与防治——浙江区域酸雨趋势与防治对策[J]. 煤矿环境保护, 1995, 9(4):25-28.
- [15] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [16] 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, 2000:164-260.
- [17] 荣立苹, 张佳奇, 赵东辉, 等. 模拟酸雨对元宝枫幼苗生理及叶绿素荧光参数的影响[J]. 经济林研究, 2019, 37(3):44-51.
- [18] Botyanszka L, Zivcak M, Chovancek E, et al. Chlorophyll fluorescence kinetics may be useful to identify early drought and irrigation effects on photosynthetic apparatus in field-grown wheat[J]. Agronomy, 2020, 10(9):1275.
- [19] 黄丹, 杨富文, 刘琳, 等. 氮及氮素形态对烤烟叶片叶绿素光合荧光参数的影响[J]. 作物杂志, 2021(1):150-159.
- [20] 胡晓梅. 酸雨胁迫对银杏生理特性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [21] 唐玲, 李倩中, 李淑顺, 等. 模拟秋季酸雨对三角枫叶片光合生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(12):2484-2490.
- [22] 张利霞, 郝国宝, 常青山, 等. 模拟酸雨胁迫对夏枯草抗氧化酶活性和光合参数的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(4):56-61.
- [23] 张琼, 陆鑫眉, 戴清霞, 等. 模拟酸雨对‘琯溪蜜柚’叶片抗氧化酶活性和光合作用的影响[J]. 果树学报, 2018, 35(7):828-835.
- [24] 齐泽民, 王玄德, 宋光煜. 酸雨对植物影响的研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2004, 26(2):36-41.
- [25] Rozendaal D M A, Hurtado V H, Poorter L. Plasticity in leaf traits of 38 tropical tree species in response to light; relationships with light demand and adult stature[J]. Functional Ecology, 2006, 20(2):207-216.

Physiological response of *Pyropia haitanensis* to dry-out and acid rain stress

WAN Wenqin, DU Xiang, QIN Xin, LUO Qijun*

(School of Marine Sciences, Ningbo, University, Ningbo 315832, China)

Abstract: To study the effect of simulated acid stress on the physiological characteristics of *Pyropia haitanensis*, different intensities of acid rain (pH values of 5.6, 4.5, 4.0, 3.5, respectively) were used in this study. Physiological indexes such as membrane permeability, antioxidant enzyme activity and chlorophyll fluorescence parameters were determined to compare the effects of acid rain stress on physiological characteristics of *Pyropia haitanensis* under proper drying and complete soaking, dark and light conditions. The results showed that: (1) After simulated acid rain exposure with different treatment methods, the tolerance of *Pyropia haitanensis* of proper drying treatment to acid rain was significantly greater than that of full soaking, and the tolerance of *Pyropia haitanensis* of dark treatment to acid rain was significantly greater than that of light treatment. (2) The physiological indicators of *Pyropia haitanensis* were most affected by acid rain stress with pH value of 3.5, while it showed mild tolerance to acid rain stress with pH value of 5.6. The current study provides a technical basis for the cultivation and management of *Pyropia haitanensis* under acid rain stress.

Key words: *Pyropia haitanensis*; simulated acid rain; physiological indicators; dry out

(责任编辑 章践立)