

酸雨胁迫对缙云山马尾松幼苗光合生理特性的影响

杨凤¹ 王云琦^{1,2} 王玉杰^{1,2} 朱锦奇¹ 裴承敏³ 李信莉^{4,1}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 重庆三峡库区森林生态系统

教育部野外科学观测研究站, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持学院,

重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083;

3. 广西壮族自治区水利科学研究院, 广西南宁 530023; 4. 北京师范大学

地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

【摘要】: 缙云山位于我国的西南酸雨区, 近年来酸雨的酸性和频率越来越高, 同时也存在硫酸型酸雨向硫酸-硝酸混合型及硝酸型酸雨转变的趋势。研究酸雨类型的转变对缙云山植被光合生理特性的影响, 为酸雨受灾区的植被建设和抗酸树种的培育提供基础数据。以缙云山两年生马尾松幼苗为研究对象, 通过4个月的盆栽实验的方法对幼苗进行了3种酸雨类型(硫酸型、硝酸型和混合型)和3个酸雨浓度(pH2.5、pH3.5、pH4.5)的处理, 并辅以pH值为5.7的蒸馏水作为对照组, 对植物的净光合速率、胞间CO₂浓度、气孔导度、蒸腾速率、抗氧化酶活性、叶绿素含量和丙二醛含量进行测定。结果表明: (1) 3种酸雨对马尾松的光合生理特性都产生了影响, 酸雨浓度越高对光合速率的抑制作用越明显; pH3.5是影响马尾松各指标发生急剧变化的酸度值, pH值为3.5的SAR和NAR酸雨对马尾松的株高增长产生严重抑制, 抑制率高达53.49%和54.99%。(2) 不同类型酸雨胁迫会抑制马尾松叶片叶绿素的形成主要表现为SAR>NAR>MAR, 叶绿素含量随酸雨浓度升高而下降; 酸雨能够促进丙二醛含量的增加, pH值越低丙二醛含量越高。(3) 酸雨会刺激植物叶片抗氧化酶活性, 不同酸雨对叶片抗氧化酶活性均产生不同程度的影响, 表现为NAR>SAR>MAR。这3种类型酸雨对马尾松幼苗的光合生理特性均有影响, 且不同类型酸雨各梯度下影响程度均不同, 综合比较发现MAR酸雨的抑制作用较其他两种单一酸雨要小, NAR酸雨对马尾松的影响最大。

【关键词】: 马尾松 酸雨胁迫 光合特性 抗氧化酶活性

【中图分类号】: X517 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)01-0124-11

酸雨是一个全球性的问题, 全球各地都受到了不同程度的影响。酸雨对于环境的影响是缓慢的, 更是持续性的。我国是继欧洲和北美之后的第三大酸雨污染区^[1,2,3]。近年来我国南部地区降雨pH平均值通常低于4.6, 甚至出现pH值为3.6的极端情况^[4,5]。

作者简介: 杨凤(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为酸雨胁迫对植物光合生理. E-mail: 1358372165@qq.com; 王云琦 E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

基金项目: 林业科学技术研究项目“三峡库区典型防护林林分结构与功能调控技术”(2017-02)

重庆市是我国南部地区酸雨危害严重地区之一,根据重庆市生态环境局的资料显示,重庆市自 2001~2017 年酸雨情况虽然有好转趋势,但问题仍然存在,酸雨频率依旧很高,再加上现在能源的调整和交通的发展,空气中 SO_2 的排放量虽得到有效控制,但汽车尾气中 NO_x 气体排放量在逐年上升,导致酸雨中的氮硫比逐年上升,所以酸雨类型由原来的硫酸型向混合型和硝酸型酸雨发生转变^[5,8]。转变后酸雨中的氮含量增加可能会改变植物的生长环境,进而会影响陆地植物生态系统。

酸雨对植物的影响是多方面的,主要表现在酸雨胁迫下植物细胞膜透性增大,阻碍叶绿素的合成^[9]。有研究表明,不同类型酸雨会破坏植物叶细胞结构,降低抗氧化酶活性^[10,11],也会对蔬菜的生长及营养品质造成影响^[12,13]。也有研究表明,酸雨会影响植物的光合作用,植物的光合能力随胁迫程度的增加而降低^[9,13,15]。酸雨也会改变土壤的理化性质,影响植物的根从土壤中吸收水分和养分,降低植物的生长发育,加剧植物病虫害,加速叶片枯黄脱落,从而导致陆地生态系统严重退化^[16,19]。目前关于酸雨影响植物光合生理特性的研究中,多数为不同浓度的硫酸型酸雨对单一树种的影响^[16,19],或者是在不同浓度硫酸型酸雨作用下多种植物生长情况的对比^[2,20,21]。重庆三峡库区植被类型丰富,其中马尾松林(*Pinus massoniana*)在库区的面积最大,约占库区植被的 34%^[22];而现阶段国内对于马尾松生长过程受不同酸雨胁迫的研究相对较少。因此研究不同类型酸雨对马尾松生长的影响变得很有必要。

本研究以马尾松为研究对象,通过盆栽模拟实验对马尾松幼苗施加不同浓度硫酸型(Sulfuric Acid Rain, SAR)、混合型(Mixed Acid Rain, MAR)和硝酸型(Nitric Acid Rain, NAR)酸雨,然后测定马尾松的植物生长量、光合参数、叶绿素含量及抗氧化酶活性等指标;分析每一种酸雨类型在不同酸度下对马尾松的影响,从而探讨在不同类型不同浓度酸雨作用下植物的生长情况,为我国酸雨类型转变区的植被建设及抗酸树种的培育上提供理论支撑和科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

试验地选于重庆缙云山,于重庆北碚区境内,嘉陵江小三峡之温塘峡西岸, $106^{\circ}17'E \sim 106^{\circ}24'E$, $29^{\circ}41'N \sim 29^{\circ}52'N$, 海拔 200~952.5m。该区属亚热带季风湿润性气候,年均降雨量为 1611.8mm,年均相对湿度 87%,雨季(4~10 月)降雨占全年的 77.2%;年均气温 13.6°C ,年均蒸发量为 777mm。土壤为黄壤及水稻土,有少量零星分布的紫色土,土壤 pH 在 3.5~4.5 之间,属于酸性土壤。



图 1 研究区地理位置

1.2 实验方法

选择 30 株长势相近且生长状态良好的两年生马尾松幼苗(平均株高 105.51cm, 地径 12.67cm), 于 2018 年 3 月移栽到塑料花盆中(直径 35cm, 高度 24cm)放置于北京林业大学林学院实验大棚内进行模拟实验。试验土壤选取缙云山当地的黄壤。幼苗移栽后进行两个月的缓苗, 在缓苗期间用自来水进行浇灌且不施肥, 只除杂草。缓苗期过后对盆栽幼苗进行为期 4 个月的喷酸处理, 选取硫酸、硝酸和混合酸 3 种类型的酸, 每种酸 3 个浓度, 另以 pH 值为 5.7 的蒸馏水作为对照, 共 10 个处理, 每个处理进行 3 个重复。具体的实验处理设置如图 2 所示。

模拟酸雨浓度的配制根据三峡库区重庆段酸雨监测分析资料以及前人配置的方法, 按照库区降雨成分中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的比值变化和降水 pH 值配制酸雨母液^[23], 如表 1; 并用蒸馏水配置(使用快速流动水质仪器调配)成 pH 值为 2.5、3.5、4.5 的酸液, 对照用 pH5.7 的蒸馏水喷施。根据三峡库区多年月均降雨量并结合盆栽面积计算确定每月喷施雨量^[24](表 2), 模拟酸雨期间用通风塑料大棚遮挡自然降雨, 喷洒时尽量把液滴调小, 以营造喷雾的效果, 喷洒频率为每月 4 次。

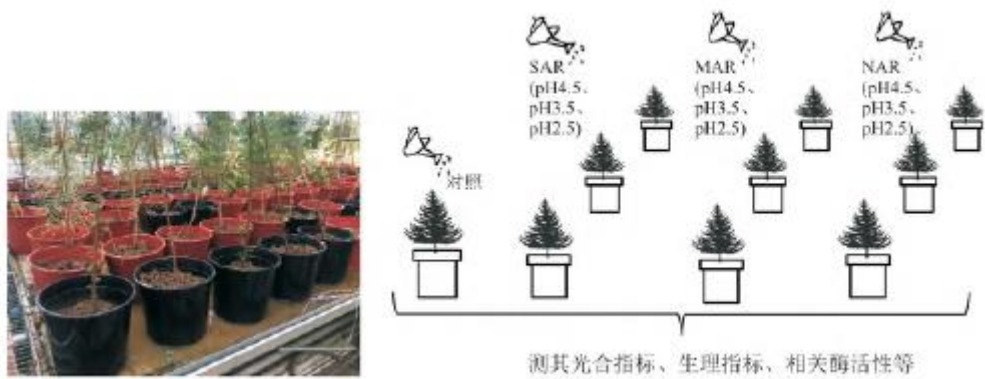


图 2 实验模拟示意图

表 1 酸雨母液配置

硫酸型	硫酸型酸雨	混合型酸雨	硝酸型酸雨
$\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^-$ (摩尔比)	5 : 1	1 : 1	1 : 5

表 2 三峡库区 1961~2016 年月均降雨

月份	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
降雨量 (mm)	146.27	171.44	194.29	149.34	116.05

1.3 指标测定

1.3.1 光合指标的测定

利用 Li-6400 便携式光合测定仪 (Li-COR) 于 2018 年 9 月测定光合参数, 同时配套使用 6400-07 针叶叶室。设置光合有效辐射强度梯度为 1500、1200、1000、800、600、400、200、150、100、50、20 和 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 12 个梯度, 叶室温度为 25°C , CO_2 浓度设置为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 气体流量为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对湿度为 50%。在测量前一天晚上给苗木浇足水分, 第二天早上 8:00~11:00 进行测量, 每个处理均取 3 株健康植株。每株选 20 个主梢上的相似并且成熟健康的针叶, 每次选 5 个针叶并排压在叶室, 做 4 个重复。测定的指标为叶片净光合速率 (Pn)、胞间 CO_2 浓度 (Ci)、气孔导度 (Cond)、蒸腾速率 (Tr)、光合有效辐射 (PAR)。

1.3.2 叶绿素含量的测定

将新鲜叶片擦净组织表面污物后去掉中脉剪碎, 称取 0.5g 放入研钵中加纯丙酮在室温下暗处浸提后提取叶绿素, 在可见光分光光度计下比色, 测定 663、645nm 波长处的吸光值。分别按舒展等的计算方法计算出叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素 a+b 的浓度^[25]。

1.3.3 抗氧化酶活性及丙二醛含量的测定

称取经过暗适应的植物叶片剪碎置于研钵中, 分两次加入总量为 10ml, $0.05\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ 的 pH7.0 磷酸缓冲液, 研磨成匀浆后, 倒入离心管中离心备用, 测定酶活性和丙二醛含量均取上清液。丙二醛 (malondialdehyde MDA) 含量的测定采用硫代巴比妥酸法 (TBA) 测定^[26]; 超氧化物歧化酶 (SOD) 采用 NBT (氮蓝四唑) 法测定^[27]; 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法测定^[28]; 过氧化氢酶 (CAT) 采用紫外分光法测定^[28]。

1.3.4 株高增长量测量

种植时在离地面 1cm 处的幼苗主干上用油漆画线作为测量株高的基线, 实验结束后利用卷尺测量试验苗株高, 按照公式计算: 株高增长量=处理后的株高一处理前的株高; 抑制率=(对照组株高增长量-实验组株高增长量)/对照组株高增长量*100%。

1.4 数据处理

采用 Excel 和 SPSS Statistics21.0 对数据进行统计分析 & 主成分分析, 软件作图用 Origin2007。

通过 SPSS Statistics21.0 进行多重因子分析, 多重因子分析是主成分分析的扩展, 是对原始变量间的内在相关结构进行分组, 相关性强的分在一组, 组间相关性较弱, 这样各组变量代表一个基本要素。利用散点图观察各因子的分数关系, 其横纵坐标表示不同因子类型。采用隶属度函数法进行综合评价, 值越大, 对酸雨类型的耐受性越强。各指标的计算公式如下:

$$U_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (\text{正相关})$$

$$U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (\text{负相关})$$

式中: U_{ij} 为酸雨耐受性值; i 代表了酸雨类型; j 表示酸雨浓度; X_{ij} 表示 i 类型 j 浓度的值; $X_{j\max}$ 为 3 种类型中 j 指标的最大值; $X_{j\min}$ 代表 3 种类型中 j 指标的最小值。

2 结果与分析

2.1 酸雨胁迫对马尾松光合特性的影响

2.1.1 净光合速率(Pn)和蒸腾速率(Tr)对酸雨和光强的响应

通过主成分分析(Principal Component Analysis PCA)评估植物在不同环境下的生理或胁迫效应,以确定对植物光合生理反应最敏感的参数,这种方法允许将一组测量数据转换成较少变量,以确定植物生理状态的变化^[29,31],本文章用于分析马尾松在酸雨胁迫下的光合生理变化情况。光合作用与蒸腾作用是植物生长发育必不可少的过程,其净光合速率与蒸腾速率之间存在极显著相关关系^[32,34]。净光合速率和蒸腾速率的大小可在一定程度上反映植物的光合作用,生命力越是强的植物其蒸腾速率越大。图3的横纵坐标分别表示植物受光照以及酸雨的影响程度,圆点越靠近坐标轴说明受到的程度越大。从图中可以看出净光合速率与蒸腾速率两两之间存在极显著相关性,净光合速率和蒸腾速率受横向的影响较大,高达71.39%,而纵向影响只有11.48%;在3种酸雨胁迫下,马尾松的净光合速率和蒸腾速率都受到了一定程度的影响,尤其是当酸雨浓度为pH2.5时,净光合速率和蒸腾速率受到了较大影响,光照强度已然不是其主要的限制因子。

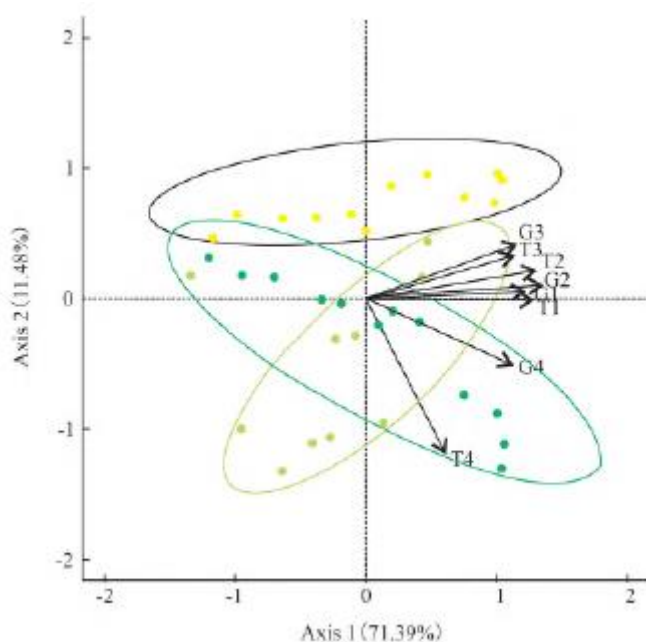


图3 马尾松 Pn 和 Tr 与光照之间的 PCA 分析

注: G1、G2、G3、G4 分别表示在酸雨的对照、pH4.5、pH3.5 和 pH2.5 处理下的净光合速率, T1、T2、T3、T4 分别表示在酸雨的对照、pH4.5、pH3.5 和 pH2.5 处理下的蒸腾速率, 箭头长短表示指标值的大小, 两两箭头间的夹角表示两者的相关性, 夹角越小相关性越大; 黄色圆点对应硝酸型酸雨, 深绿色对应混合型酸雨, 浅绿色对应硫酸型酸雨(下同)。

再根据图4来看, 各散点图表示两两因子之间得分的关系, p 值表示两个因子之间的显著性差异, $p < 0.001$, 表明马尾松的净光合速率和蒸腾速率与光照强度有极显著性; r 值表示两个因子之间的相关性, 值越大说明两者之间相关性越强。图中净光合速率和蒸腾速率均与光合有效辐射呈现出正相关关系, 随着酸雨浓度的逐渐增大, Pn 和 Tr 收到的影响越来越明显, 上升趋势逐渐变缓; 净光合速率与蒸腾速率之间也存在显著正相关关系。不同浓度酸雨处理会导致净光合速率和蒸腾速率与光照强度的关系发生变化, 当低浓度酸雨作用时, 净光合速率和蒸腾速率与光合有效辐射呈现出明显的上升趋势, 且相关性强, r 值分别为 0.76 和 0.93, 说明此时光照强度是关键影响因素; 当酸雨浓度升高时, 上升趋势有所变缓, 相关性也变小, r 值分别下降到 0.57 和 0.36, 表明光照强度不再是唯一关键影响因素, 图4的多重分析验证了图3的变化关系。

2.1.2 酸雨对气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)的影响

气孔是植物与外界进行水汽与 CO_2 气体交换的主要通道，气孔的关闭会影响 CO_2 进入植物叶片从而影响光合速率^[35]。如图 5 所示，气孔导度和胞间 CO_2 浓度受横向的影响比受纵向影响大，当气孔导度越大时，胞间 CO_2 浓度越大。随着酸雨胁迫的时间延长与浓度的增大，气孔导度逐渐减小，胞间 CO_2 浓度也相应降低。气孔导度和胞间 CO_2 浓度受光照强度的影响比较明显，且在不同类型不同浓度的酸雨作用下，气孔导度和胞间 CO_2 浓度均发生不同程度的变化；酸雨浓度的增大，会使气孔导度和胞间 CO_2 浓度逐渐减小，从而降低光合作用，从图上看到 NAR 酸雨胁迫最明显，可能大量 N 的融入一定程度上引起了植物叶片的生理活动发生变化。

再对比图 6 发现，不同浓度酸雨处理会影响胞间 CO_2 和气孔导度与光照强度的关系发生变化，胞间 CO_2 浓度和光合有效辐射呈负相关关系，当胞间 CO_2 浓度下降到一定时，胞间 CO_2 浓度不再随着光照强度的增大而大幅度变化，变化趋势趋于平缓；气孔导度与光照强度的呈正相关，气孔导度随着光照强度的增大呈上升趋势，当酸雨浓度越大时上升趋势逐渐变缓。

2.2 酸雨胁迫对马尾松生理特性的影响

2.2.1 酸雨对叶片抗氧化酶活性的影响

在 3 种类型酸雨胁迫下马尾松叶片中的 3 种抗氧化酶的酶活性发生了剧烈变化(图 7)。在胁迫期，与 CK 相比，pH4.5 酸雨使马尾松叶片中 SOD 和 CAT 活性增大，且在不同类型酸雨处理下的活性表现为 $\text{NAR} > \text{SAR} > \text{MAR}$ ；当 $\text{pH} \leq 4.5$ 时，抗氧化酶活性随 pH 值的减小而下降，但总体依旧比 CK 大。POD 活性变化与其他两种酶变化趋势不太一致，表现出 pH4.5 的 SAR 型酸雨处理下酶活性低于 CK，但随着酸雨浓度的增大而活性变大；在 MAR 和 NAR 两种类型酸雨作用下表现出与其它两种酶活性变化趋势相同，表明不同类型酸雨处理对酶活性的影响机理有所差异。

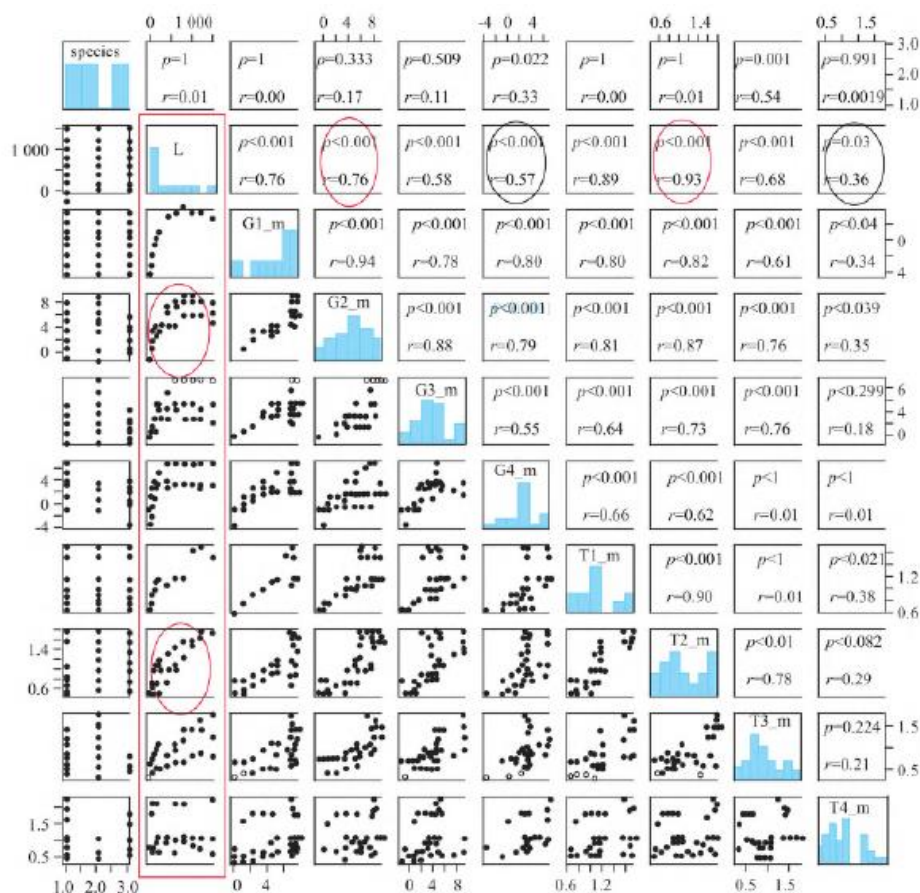


图4 马尾松 Pn 和 Tr 与光照间的多重因子关系

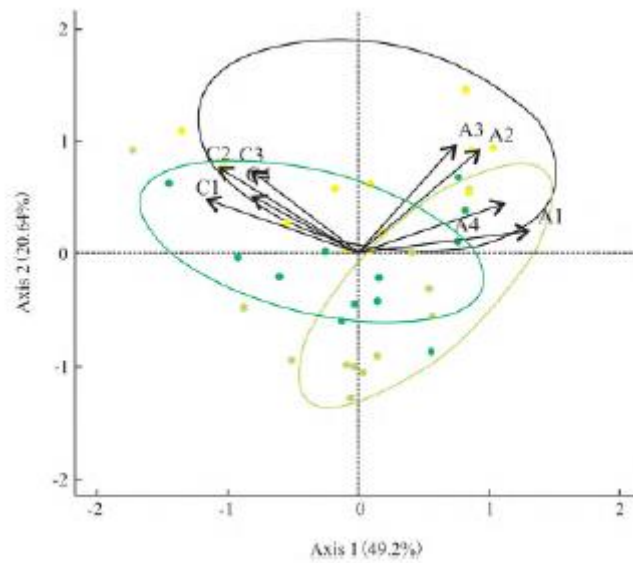


图5 马尾松 Ci 和 Gs 与光照之间的 PCA 分析

注：A1、A2、A3、A4 分别表示在酸雨的对照、pH4.5、pH3.5 和 pH2.5 处理下的气孔导度，C1、C2、C3、C4 分别表示在酸雨的对照、pH4.5、pH3.5 和 pH2.5 处理下的胞间 CO₂ 浓度(下同)。

2.2.2 酸雨胁迫对丙二醛和叶绿素含量的影响

图8 为马尾松喷施3 种类型酸雨后叶片中的丙二醛和叶绿素含量变化的情况。从图中可以看出，3 种类型酸雨处理后，对叶片丙二醛的含量均产生了影响。与对照相比，马尾松叶片丙二醛含量均有不同程度的升高，随着酸雨浓度的增加，产生的效应也增大；喷施相同浓度的酸雨，pH 为 4.5 和 3.5 时硝酸型酸雨比其他两种酸雨处理后的丙二醛含量大，SAR 和 MAR 酸雨处理下，MDA 含量呈直线上升趋势。叶绿素含量的高低与植物叶片的生理特性有着密切联系，也会直接影响植物的光合作用。图中亦可看出 3 种类型酸雨处理对马尾松叶绿素的含量均产生了影响，与对照相比，马尾松叶片叶绿素含量均有不同程度的降低，随着酸雨浓度的增加，产生的效应也增大。喷施相同浓度不同类型的酸雨，当 pH 为 2.5 时，SAR 酸雨处理下的叶绿素含量最低，其下降幅度最大。

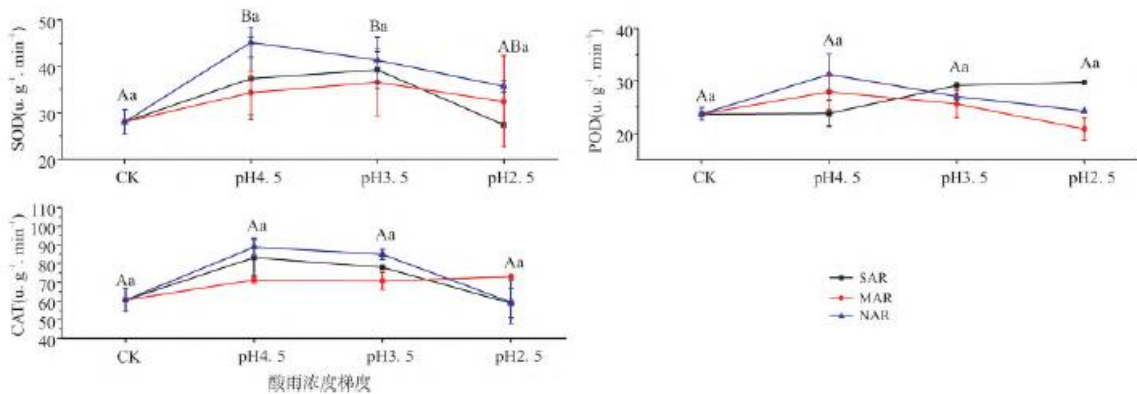


图7 酸雨胁迫下叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的变化

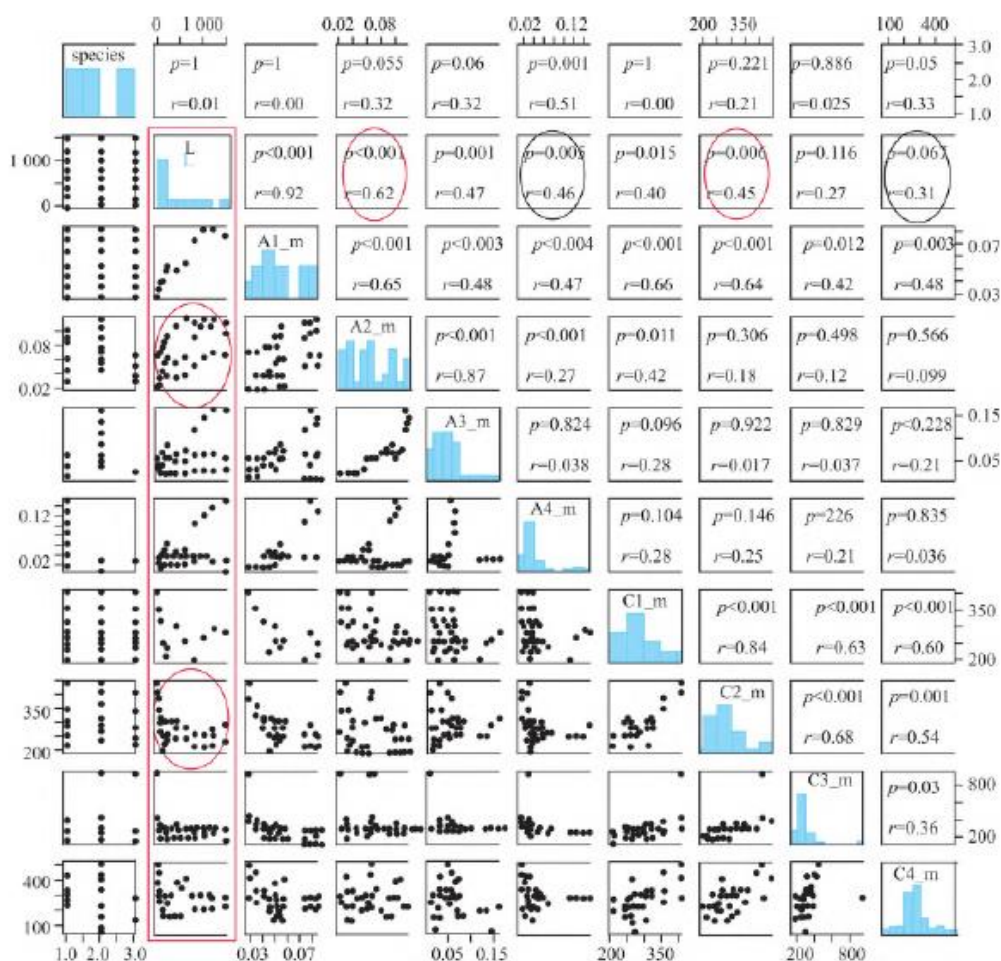


图6 马尾松 Ci 和 Gs 与光照间的多重因子关系

注：大写字母表示同一酸雨类型的不同酸雨浓度之间有显著差异，小写字母表示同一酸雨浓度的不同酸雨类型之间有显著差异(下同)。

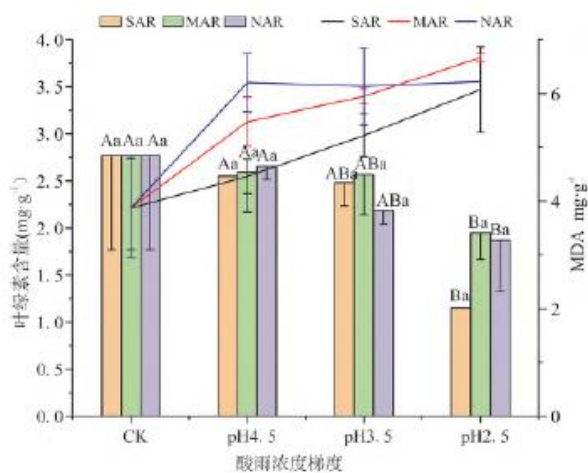


图 8 酸雨胁迫下叶绿素含量和 MDA 含量的变化

2.2.3 酸雨胁迫下株高增长量的变化

株高是植物形态学调查工作中最基本的指标之一，植物生长的高度不仅取决于植物种类遗传因素，它还会受到外界环境因素的影响。表 3 反映了马尾松株高增长量受酸雨胁迫的影响情况。

从表 3 可知，在酸雨胁迫下，马尾松株高的增长量除了 pH3.5MAR 处理下高于 CK，其他处理均低于 CK。整体来看，与 CK 相比，SAR 酸雨处理对马尾松株高的抑制作用最大。SAR 酸雨对马尾松株高增长的抑制作用为 pH3.5>pH2.5>pH4.5，抑制率分别为 53.49%、39.14%、34.76%；NAR 酸雨对马尾松株高增长的抑制作用为 pH3.5>pH2.5>pH4.5，抑制率分别为 54.99%、24.98%、20.42%；MAR 酸雨对马尾松株高增长的抑制作用为 pH4.5>pH2.5，抑制率分别为 34.76%、8.68%，而 pH3.5 表现出促进作用。结合表 3 可知，三种类型酸雨作用下，马尾松株高受酸雨抑制作用为 SAR>NAR>MAR。

表 3 酸雨胁迫下马尾松株高增长量隶属函数值和综合评判结果

酸雨类型	处理指标				平均值	排名
	X1	X2	X3	X4		
SAR	0.000	0.000	0.030	0.000	0.01	3
MAR	0.000	0.000	1.000	1.000	0.667	1
NAR	0.000	1.000	0.000	0.460	0.487	2

3 讨论

3.1 酸雨对叶片抗氧化酶活性的影响

研究表明马尾松通过调节抗氧化酶活性来提高自我保护的能力，以减少外界的伤害；随着酸雨浓度的增大，酶活性逐渐上升，植物可以通过调节自身酶活性、可溶性蛋白质含量和释放 GLVs 降低 ROS 对细胞膜的损伤来提高适应环境的能力。孙业民等^[11]的研究结果表明酸雨浓度越低，则云杉(*Picea asperata*)抗氧化酶活性和细胞膜稳定指数就越低，且相比 SAR 酸雨而言，在较强的酸度下，NAR 酸雨胁迫对云杉叶片表现出较强的氧化能力，破坏细胞保护系统，从而损伤细胞膜。在本研究中马尾松叶片的抗氧化酶活性随酸雨胁迫呈现出先上升后下降趋势，且 NAR 酸雨对马尾松的叶片抗氧化酶活性的影响比其他两种酸雨的影响要大；低浓度酸雨处理能激发酶活性，当浓度达到一定程度时，植物细胞的保护系统会受到破坏，随着 pH 值减小酶活性会随之下降，从而在植物的生长过程起到阻碍作用。本研究发现当 pH 值 ≤ 4.5 时，各种酶活性均表现出不同程度的下降趋势，尤其在 NAR 酸雨处理下，酶活性下降幅度最大，可能是 N 元素的占比增大增强了氧化性，这一结果说明不同类型酸雨处理对酶活性的影响机理有所差异。

3.2 酸雨胁迫对丙二醛和叶绿素含量的影响

叶绿素在植物进行光合作用过程中起核心作用。在酸雨胁迫下，叶绿素的合成会受到抑制，不同植物叶绿素含量对酸雨的响应不同^[9,13]。张维娜等^[37]关于紫茎泽兰的研究表明 pH5.0 至 pH4.0 的酸雨处理使叶绿素含量下降，而在 pH3.0 时则显著增加；而齐泽民等^[9]对杜仲(*Eucommia ulmoides*)的酸雨模拟实验为叶绿素含量随 pH 值降低而降低；本文结果与齐泽民研究结果相同，这

或许与选取的植物叶子的结构和质地不同有关,3 种类型酸雨对马尾松叶片中 MDA 含量和叶绿素含量均有影响。Heath 等^[38]发现,叶绿素的漂白和 MDA 的产生是同时发生的,且其叶绿素最小值和 MDA 最大值在时间上是一致的,他们认为叶绿体的膜过氧化可能与光合系统 II 的失活有关。从这一角度分析,叶绿体膜在酸雨胁迫下,膜发生过氧化对叶绿素的行成过程产生抑制作用,使得叶绿素含量下降。这一点在本文中也有所体现,叶绿素含量最小值和 MDA 最大值是对应的,且 NAR 酸雨影响最为显著,这可能是通过影响抗氧化酶活性破坏细胞膜结构产生大量氧化终产物 MDA 从而抑制了叶绿素的形成,降低光合作用,阻碍植物的生长。

3.3 酸雨胁迫对马尾松光合特性的影响

当植物受到外界环境胁迫时,其光合生理特性会发生变化^[39,40]。本研究在对马尾松进行酸雨胁迫时发现,不同类型的酸雨对马尾松的影响存在差异。3 种酸雨类型作用下均表现出马尾松在受到轻度酸雨胁迫时,净光合速率、气孔导度、蒸腾速率随光合有效辐射的增大而呈上升趋势,说明在一定程度上酸雨环境可以促进马尾松的光合效率;但随着酸雨浓度的增大,上升趋势变缓,高浓度酸雨处理后,气孔导度变小,CO₂浓度降低,使得马尾松的光合速率下降,抑制马尾松的光合作用,从而减少了物质生产。本文还发现混合型酸雨对马尾松净光合速率的胁迫大于其他两种单一性酸雨,这可能是由于氮是叶绿体结构的重要组成部分,对植物的光合作用既能表现出促进也能表现出抑制。尹丽对麻疯树(*Barbadosnut*)的研究中,发现适量施氮对麻疯树幼苗光合有促进作用,氮量一旦过高则会降低光合作用等^[41]。因此酸雨中硫氮比值不同对植物的净光合速率的影响也不同,对植物的光合作用有促进也有抑制作用。

3.4 酸雨胁迫下株高生长量的变化

前人的研究表明,不同植物的生理特性对酸雨胁迫的响应是不一样的^[16,20]。酸雨的长期作用会使植物的生理特性发生变化,浓度越高的酸雨对植物的生长越不利^[2],这可能是植物种源和模拟酸雨处理时间长短不同造成的差异。金清等^[21]的研究发现酸雨对甜槠和杉木幼苗的株高影响不显著,但是在一定程度上促进了马尾松幼苗的株高。本研究结果与其不同,在本研究中,除了 MAR 酸雨处理下马尾松幼苗株高表现为 pH3.5 大于对照外,其他类型及浓度酸雨对马尾松均有抑制作用,且在 pH3.5 时抑制率达到最大,这可能与苗木种源、酸雨处理时间不同有关,也可能是少量 N 元素的增加促进了植物的生长,而当酸度过高 N 元素含量过多时对植物的生长产生严重抑制作用;SAR 和 NAR 酸雨表现为胁迫效应先减弱后加强。3 种酸雨作用下对马尾松株高的胁迫效应有明显差异,以 SAR 抑制最强。本研究是进行盆栽实验处理,这是为了试验方便处理的均匀和一致性,这种处理结果的重复性相对较好,但并不能等同于实际野外的酸雨对马尾松的影响,只能作为了解不同酸雨对植物生长影响的参照。

4 结论

(1) 不同类型模拟酸雨对马尾松光合特性指标都产生了不同程度的影响,表现为酸雨浓度越高对植物的光合速率的抑制作用越明显,且 NAR 酸雨对马尾松的影响比其他两种酸雨大;pH3.5 是影响马尾松各指标发生急剧变化的酸度值。(2) 不同类型酸雨胁迫对马尾松叶片的叶绿素形成都产生了抑制作用,同一浓度不同类型酸雨作用下表现为 SAR>NAR>MAR;且酸雨胁迫能够促进马尾松叶片 MDA 的产生,从而破坏细胞结构影响马尾松生长。(3) 酸雨能够刺激植物细胞中抗氧化酶活性,不同酸雨对马尾松叶片抗氧化酶活性产生的影响不同,随着酸雨浓度的增大,抗氧化酶活性逐渐降低,相比而言,NAR 酸雨对抗氧化酶活性的影响大于 SAR 酸雨,MAR 酸雨对其影响最小。综合比较,MAR 酸雨的抑制作用较其他两种单一酸雨要小。但由于本研究对不同类型酸雨处理的马尾松生长状况仅进行了短期的研究,随着时间的推移和马尾松年龄的增大,马尾松生长特性是否会发生变化还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 陈静. 大气酸沉降及其环境效应的研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 1999(1): 82-88.

-
- [2]李佳. 模拟酸雨对 4 种浙江省常见阔叶和针叶树种幼苗光合生理生态的影响[D]. 浙江农林大学, 2010.
- [3]蔡朋程. 浅析中国的酸雨分布现状及其成因[J]. 科技资讯, 2018, 16(15):127-128.
- [4]HUANG X F, LI X, HE L Y, et al. 5-Year study of rainwater chemistry in a coastal mega-city in South China[J]. Atmospheric Research, 2010, 97(1-2):185-193.
- [5]ZHANG Y L, LEE X Q, CAO F. Chemical characteristics and sources of organic acids in precipitation at a semi-urban site in Southwest China[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(2):413-419.
- [6]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.
- [7]QIAO X, DU J, KOTA S H, et al. Wet deposition of sulfur and nitrogen in Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, China during 2015-2016: Possible effects from regional emission reduction and local tourist activities[J]. Environmental Pollution, 2017, 233:267.
- [8]张灿, 孟小星, 张关丽. 重庆地区酸雨污染现状[J]. 绿色科技, 2018(16):11-14.
- [9]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.
- [10]马兰. 不同类型酸胁迫对云杉和多花黑麦草抗性生理的影响[D]. 甘肃农业大学, 2010.
- [11]孙业民, 马兰, 李朝周. 不同类型酸胁迫对云杉叶细胞膜及其保护系统损伤机制的比较[J]. 林业科学, 2012, 48(6):56-62.
- [12]房春生, 王帆, 金艺娜, 等. 不同类型酸雨对小白菜生长及品质的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(22):6526-6532.
- [13]郑有飞, 麦博儒, 梁骏, 等. 不同类型模拟酸雨对油菜营养品质的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10):2133-2140.
- [14]鲁美娟, 江洪, 李巍, 等. 模拟酸雨对刨花楠幼苗生长和光合生理的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(11):5986-5994.
- [15]吴春笃, 戴竞, 阿琼, 等. 酸雨的研究现状及新兴趋势的可视化分析[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1):344-353.
- [16]吴善才. 林木对酸沉降的敏感性和抗性[J]. 广西林业科学, 2002(4):186-189, 201.
- [17]梁骏, 麦博儒, 郑有飞, 等. 模拟酸雨对油菜(*Brassica napus* L.) 生长、产量及品质的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(1):274-283.
- [18]樊后保, 臧润国. 女贞种子和幼苗对模拟酸雨的反应[J]. 林业科学, 2000, 36(6):90-94.
- [19]李志国, 翁忙玲, 姜武, 等. 模拟酸雨对乐东拟单性木兰幼苗部分生理指标的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1):31-34.

-
- [20]刘可慧, 于方明, 彭少麟, 等. 模拟酸雨对珍稀濒危植物红豆杉幼苗的影响研究[J]. 生态环境, 2007, 16(2):309-312.
- [21]金清, 江洪, 余树全, 等. 酸雨胁迫对亚热带典型树种幼苗生长与光合作用的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(6):3322-3327.
- [22]程瑞梅. 三峡库区森林植物多样性研究[D]. 中国林业科学研究院, 2008.
- [23]郭平. 三峡库区酸沉降特征及其对森林土壤的影响[D]. 北京林业大学, 2016.
- [24]秦文静. 三峡库区王家桥流域径流对气候变化和土地利用的响应研究[D]. 北京林业大学, 2018.
- [25]舒展, 张晓素, 陈娟, 等. 叶绿素含量测定的简化[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(4):399-402.
- [26]赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994:207-210.
- [27]BEAUCHAMP CHARLES, FRIDOVICH IRWIN. Superoxide dismutase:Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. [J]. Academic Press, 1971, 44(1).
- [28]王瑞刚, 陈少良, 刘力源, 等. 盐胁迫下 3 种杨树的抗氧化能力与耐盐性研究[J]. 北京林业大学学报, 2005(3):46-52.
- [29]杨春祥, 李宪利, 高东升. 钙对低温胁迫下油桃花果膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. 落叶果树, 2004, 36(6):1-3.
- [30]JOLLIFFE I T. Graphical representation of data using principal components. In: Jolliffe, I. T. (Ed.), Principal Component Analysis, Springer Series in Statistics. Springer, New York, pp. 2002, 78-110.
- [31]VASILIJ GOLTSEV, IVELINA ZAHARIEVA, PETKO CHERNEV, et al. Drought-induced modifications of photosynthetic electron transport in intact leaves: Analysis and use of neural networks as a tool for a rapid non-invasive estimation[J]. Elsevier B. V., 2012, 1817(8).
- [32]王艳荣, 刘玉燕, 赵利清. 草地早熟禾光合与蒸腾特性的研究[J]. 中国草地, 2003, 25(4):46-49.
- [33]周婵, 郭晓云, 王仁忠, 等. 松嫩草地虎尾草光合与蒸腾作用的研究[J]. 草业学报, 2001, 10(1):42-47.
- [34]杨静慧, 季婷婷, 张般般, 等. 冬季雾霾对常绿植物净光合速率与蒸腾速率的影响[J]. 天津农林科技, 2017(5):1-3.
- [35]杨泽粟, 张强, 郝小翠, 等. 半干旱雨养地区春小麦气孔导度和胞间二氧化碳浓度对环境因子的响应[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(33):20-27.
- [36]郭慧媛. 毛竹对模拟酸雨胁迫的生理生化响应机制[D]. 中国林业科学研究院, 2014.
- [37]张维娜, 廖周瑜, 朱娟, 等. 紫茎泽兰对模拟酸雨胁迫的生理反应[J]. 林业科技, 2009(4):18-21.
- [38]HEATH ROBERT L, PACKER LESTER. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of

fatty acid peroxidation[J]. Academic Press, 1968, 125(1).

[39] CHEN S, BAI Y, ZHANG L, et al. Comparing physiological responses of two dominant grass species to nitrogen addition in Xilin River Basin of China[J]. Environmental & Experimental Botany, 2005, 53(1): 65-75.

[40] 田大伦, 付晓萍, 方晰, 等. 模拟酸雨对樟树幼苗光合特性的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(8): 29-35.

[41] 尹丽, 胡庭兴, 刘永安, 等. 施氮量对麻疯树幼苗生长及叶片光合特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4977-4984.