

黑龙江省 9 个杨树品种的抗旱性分析

李卓龙¹, 毕宇², 贾宝鹏¹, 陈熹¹, 靳婷婷¹, 李慧玉¹, 黄海娇^{1*}

(1. 林木遗传育种国家重点实验室(东北林业大学), 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省林业科学院齐齐哈尔分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要: 为筛选适应不同水分立地的杨树优势品种, 以黑龙江省 9 个主栽杨树品种——基地种源青杨 (JDQY)、中黑防杨 2 号 (ZHF2)、齐林 1 号杨 (2111)、黑青杨 (HQY)、银中杨 (YZY)、1019 号杨 (1019)、黑防 3 号杨 (QSY)、带岭 × 欧 406 号杨 (406)、龙丰 2 号杨 (LF2) 为对象, 通过设置土壤水分梯度 (轻度干旱 HL 为 14%~18%; 中度干旱 HM 为 6%~10%), 系统测定其表现形态、叶片含水率、叶绿素相对含量 (SPAD 值)、离子代谢及抗氧化酶活性等 14 项生理生化指标。基于主成分分析及隶属函数法综合评价表明, 1) 轻度干旱胁迫下抗旱性排序由大到小为 JDQY、HQY、QSY、YZY、LF2、2111、406、ZHF2、1019; 2) 中度干旱胁迫下抗旱性排序由大到小为 JDQY、HQY、2111、YZY、LF2、QSY、ZHF2、406、1019。研究发现, JDQY 通过显著积累 K^+ 和 Ca^{2+} 维持渗透平衡, HQY 依赖超氧化物歧化酶 (SOD) 活性快速响应抵御氧化损伤, 二者在 2 种胁迫下均表现出广谱抗旱性。研究结果揭示黑龙江省 9 个主栽杨树品种的抗旱性差异及生理机制, 筛选出基地青杨 (JDQY)、黑青杨 (HQY) 等抗旱优势品种, 为寒旱区抗逆造林与精准化树种选择提供理论支撑。

关键词: 干旱胁迫; 杨树; 树种选择; 主成分分析; 隶属函数法

中图分类号: S722

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.011

Analysis of Drought Resistance in Nine Poplar Varieties in Heilongjiang Province

LI Zhuolong¹, BI Yu², JIA Baopeng¹, CHEN Xi¹, JIN Tingting¹, LI Huiyu¹, HUANG Haijiao^{1*}

(1. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding (Northeast Forestry University), Harbin 150040, China; 2. Heilongjiang Academy of Forestry, Qiqihar Branch, Qiqihar 161006, China)

Abstract: To identify superior poplar varieties adapted to different soil moisture conditions, this study evaluated nine major cultivated poplar varieties in Heilongjiang Province—namely, *Populus cathayana* (JDQY), *Populus deltoides* × *P. cathayana* ZHF2, (*Populus* × *euramericana*) × (*P. simonii* × *P. nigra*) (2111), *Populus euramericana* 'N3016' × *P. ussuriensis* 'HQ-1' (HQY), *P. alba* L × *P. berolinensis* Dippel (YZY), 1019, *Populus* 'Heifang-3' (QSY), 406, and *Populus deltoides* × *Populus simonii* 'LongFeng-2' (LF2). By applying two soil moisture gradients (mild drought, HL is 14%~18%; moderate drought, HM is 6%~10%), we systematically measured 14 morphological and physiological-biochemical indicators, including apparent morphology, leaf water content, relative chlorophyll content, ion metabolism, and antioxidant enzyme activities. Based on principal component analysis and membership function evaluation, the drought resistance rankings were as follows: (1) under mild drought, JDQY, HQY, QSY, YZY, LF2, 2111, 406, ZHF2, 1019; (2) under moderate drought, JDQY, HQY, 2111, YZY, LF2, QSY, ZHF2, 406, 1019. Research indicated that, JDQY maintained osmotic balance by significantly accumulating K^+ and Ca^{2+} , while HQY responded rapidly to oxidative stress via elevated superoxide dismutase (SOD) activity, both exhibited broad-spectrum drought resistance under two types of stress. This study reveals inter-varietal differences in drought resistance and underlying physiological mechanisms among the nine poplar varieties, identifying JDQY and HQY as drought-tolerant candidates. The findings provide

收稿日期: 2025-04-08

基金项目: 农业生物育种国家科技重大专项 (2023ZD0405603)。

第一作者简介: 李卓龙, 硕士研究生。研究方向为林木遗传育种。E-mail: lizhuolong@nefu.edu.cn

* 通信作者: 黄海娇, 博士, 高级实验师。研究方向为林木遗传育种。E-mail: haijiao_sea@163.com

引文格式: 李卓龙, 毕宇, 贾宝鹏, 等. 黑龙江省 9 个杨树品种的抗旱性分析 [J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1206-1217.

LI Z L, BI Y, JIA B P, et al. Analysis of drought resistance in nine poplar varieties in Heilongjiang Province [J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1206-1217.

a theoretical basis for stress-resilient afforestation and precision tree species selection in cold, drought-prone regions.

Keywords: Drought stress; poplar; species selection; principal component analysis; membership function method

0 引言

黑龙江省地处东北地区,属高纬度寒冻地貌区,植被类型以温带针阔叶混交林和寒温带针叶林为主,是气候敏感区,同时也是我国气候变化最显著的区域之一^[1]。近百年来,东北地区气温呈显著上升趋势,降水量逐渐减少,且近44 a暖干化趋势明显,升温速率明显高于北半球同纬度其他区域^[2-5]。在年平均气温持续升高与降水量减少的共同作用下,黑龙江省干旱化进程呈现持续加剧的现象,未来势必将会出现更多的干旱造林地。干旱胁迫不仅是影响植物生长发育的非生物因素之一,同时也是影响森林生物量减少的重要原因^[6]。杨树作为杨柳科(Salicaceae)杨属(*Populus*)落叶乔木,其天然分布区覆盖北半球中高纬度地区,兼具重要经济价值和生态防护功能。在应对全球生态环境变化与实现可持续发展目标方面,杨树种质资源的耐旱性研究具有特殊战略意义^[7]。近年来,关于杨树耐旱性机制以及品种筛选的研究逐渐增多,主要集中在干旱胁迫下的生理生化响应、基因表达特征及抗旱种质资源评价等方面^[8-10]。然而,目前大多数研究聚焦于少数特定品种或单一胁迫水平,缺乏针对黑龙江省主栽品种在不同干旱强度条件下系统比较的研究,在实际林业生产中的应用价值有待加强。为此,本研究选取黑龙江省9个主栽杨树品种为研究对象,分别设置轻度、中度干旱胁迫处理,系统解析不同品种在生长及渗透调节等关键生理环节的响应差异。研究成果可为不同水分条件造林地树种合理配置与高效造林提供科学依据,为东北地区森林资源可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为黑龙江省林业科学院齐齐哈尔分院所提供的1019号杨(1019)、齐林1号杨(2111)[(*Populus×euramericana*)×(*P. simonii*×*P. nigra*)]、带岭×欧406号杨(406)、黑青杨(HQY)(*Populus euramericana* 'N3016'×*P. ussuriensis* 'HQ-1')、基地种源青杨(JDQY)(*Populus cathayana*)、龙丰2号杨(LF2)(*Populus deltoides*×*Populus simonii* 'LongFeng-2')、黑防3号杨(QSY)(*Populus* 'Heifang-3')、银中杨(YZY)(*P. alba* L×*P. berolinensis* Dippel)、中黑防杨2号(ZHF2)(*Populus deltoides*×*P. cathayana*),共计9个品种杨树无性系扦插苗。

1.2 试验方法

试验于2023年4月在东北林业大学白桦强化种子园(126°38'E,45°43'N)进行,挑选健康且长度基本一致的各品种杨树茎段作为插穗,统一扦插于18 cm×18 cm的塑料营养钵中,每盆一株,基质为自配土,即由草炭土、珍珠岩以3:2的比例混合配制而成,同时添加磷酸二铵复合肥料做底肥^[11]。在高透光薄膜大棚内正常培养,定时定量浇水,自然光照。于7月底选取健康且长势一致的植株进行处理。

干旱胁迫试验每个品种设置3个处理,正常水分处理(CK)、轻度干旱胁迫(HL)、中度干旱胁迫(HM)。CK为正常水分管理;HL为14%~18%土壤体含水量;HM为6%~10%土壤体含水量。每个处理设置9次重复,每个品种共计27盆植株,其中每个处理选择3盆植株挂牌且不采集叶片,仅用于生长性状调查,其余6盆植株用于取样进行其他测定。每日早晚使用水分测定仪(SPECTRUM TDR350)进行控水,使各胁迫梯度保持在控制范围内,试验共计维持20 d。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长性状调查

干旱胁迫前后,利用直尺测量各植株株高,游标卡尺测量各植株地径,并拍照记录。干旱处理结束后需观察各植株干旱程度,根据表1统计旱害指数^[12]。胁迫结束后进行复水,一周后统计各品种杨树成活率。

表1 旱害指数分级
Tab. 1 Drought index classification

分级 Grade	症状 Symptomatic
0级 Grade 0	植株叶色正常,叶尖、叶缘不向内反卷,无叶柄向下弯曲
1级 Grade 1	叶片主叶脉向下弯曲,叶片无焦枯
2级 Grade 2	叶片卷缩,叶尖、叶缘变色,有叶片焦枯迹象,少量叶片脱落
3级 Grade 3	植株叶片大部分焦黄,皱缩严重,叶片大部分叶脱落
4级 Grade 4	大量叶片脱落,植株甚至枯死

1.3.2 叶片含水率测定

将新采集的9个杨树品种各无性系第3、4片完全展开的健康功能叶片迅速剪成小块,每个处理重复3次,称取1 g的2份鲜样鲜质量(fresh weight, W_f),一份置于烘箱烘至恒质量称得干质量(dry weight, W_d)。

其方法为将叶片放入信封纸内,编号,置于105°烘箱20 min,再将温度调整至85°持续烘干,对其进行称质量,称3次,数值没有变化结束烘干。一份置于蒸馏水浸泡1 h左右至恒质量时,记录其饱和鲜质量(turgid weight, W_t)。相对含水量(relative water content, RWC)为 $(W_t - W_d)/(W_t - W_d) \times 100\%$ ^[13]。

1.3.3 叶片叶绿素相对含量(SPAD值,下同)测定

使用手持式便携叶绿素测定仪(SPAD-502 Chlorophyll Meter Model)测定第3、4片完全展开功能叶,每个处理测定3个植株,每个植株重复3次。

1.3.4 叶片气孔表型测定

于9:00—10:00,将透明指甲油涂抹于新鲜叶片背面,待凝固后取下叶片带回实验室,把胶带粘贴在叶片背面凝固的指甲油上,使二者之间无气泡充分接触,轻轻撕下胶带,张贴在载玻片上,置于光学显微镜下观察气孔长、气孔宽,并测量^[14]。

1.3.5 离子质量浓度测定

植物金属离子的测定需将植物样品烘干至恒质量,烘干结束后,将烘干的样品取0.4 g剪碎置于50 mL离心管中,加入5 mL 30%稀硝酸进行消解,消解90 min,消解至样品变成白色絮状物。将消解好的溶液放置于水浴锅中进行高温赶酸,直至溶液从5 mL赶至1 mL,结束赶酸。随后将溶液用去离子水定容至50 mL,利用0.45 μm 的水性滤膜对溶液进行过滤,过滤后的溶液静置几小时,待粉末完全沉淀后再进行二次过滤。配置质量浓度为2、5、10、50、100 mg/L的钾钙钠镁离子标准液,并将标准液用0.45 μm 的水性滤膜进行过滤。最后利用ICP-OES(5110, Agilent)测定样品中的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 质量浓度,上述测定过程进行3次生物学重复。

1.3.6 丙二醛(Malondialdehyde, MDA)质量摩尔浓度测定

采集各品种每种处理新鲜叶片各3片,用冰盒带回实验室后,使用液氮迅速冷冻保存。测定采用丙二醛质量摩尔浓度试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)。

1.3.7 超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)活性测定

采集各品种每种处理新鲜叶片各3片,用冰盒带回实验室后,使用液氮迅速冷冻保存。测定采用超氧化物歧化酶——WST-8法活性测定试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)。

1.4 数据分析

使用Microsoft Excel 2019对试验数据进行记录与

整理,采用IBM SPSS Statistics 26进行统计分析,差异显著性采用Duncan法。主要运用公式如下。

1)主成分分析:对各单项指标的值进行主成分分析,将其转换为新的独立综合指标。

2)隶属函数分析^[15]公式为

$$U(X_j) = (X_j - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (1)$$

3)权重计算公式为

$$W_j = P_j / \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

4)综合评价^[16-17]公式为

$$D = \sum_{i=1}^n [U(X_j) \cdot W_j] \quad (3)$$

式中: X_j 为第 j 个综合指标; $X_{j\min}$ 为第 j 个综合指标的最小值; $X_{j\max}$ 为第 j 个综合指标的最大值; W_j 为第 j 个综合指标在所有综合指标中的权重; P_j 为各品种第 j 个综合指标的贡献率; D 为各材料的耐旱性综合评价。

2 结果与分析

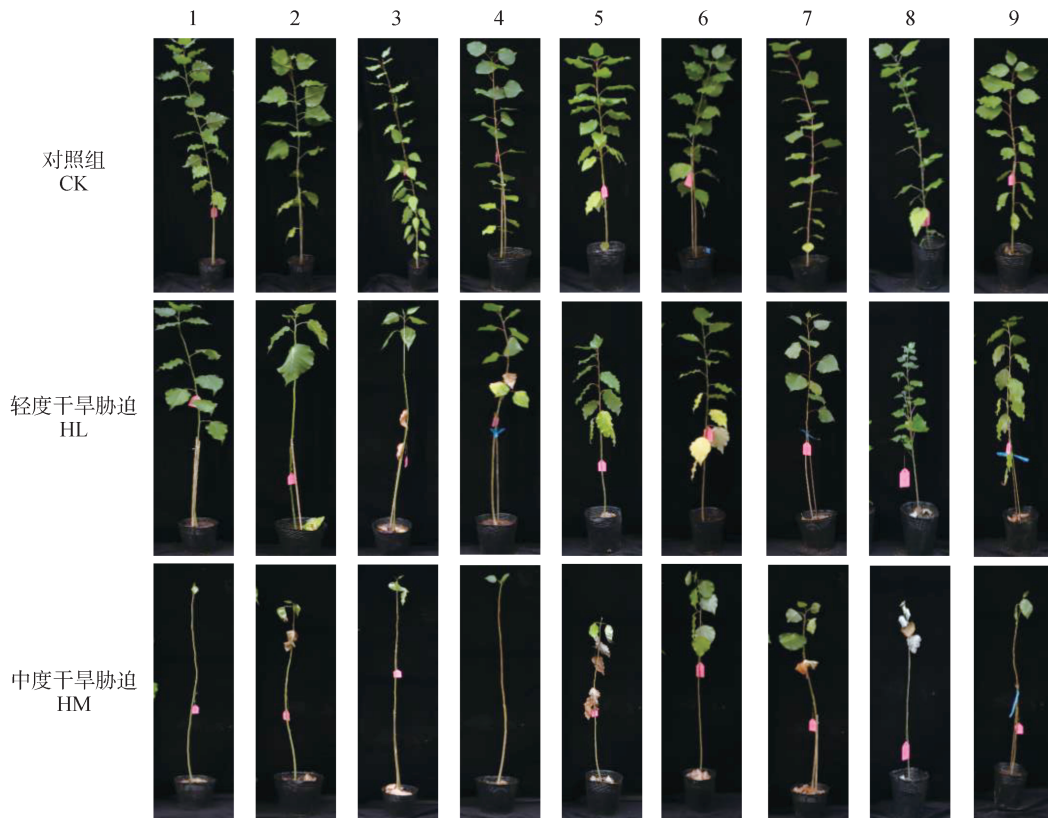
2.1 干旱胁迫对不同品种杨树生长性状的影响

轻度干旱、中度干旱处理20 d后,9个杨树品种表现形态变化差异明显,如图1所示。在轻度干旱胁迫下,JDQY、HQY、LF2、1019、YZY及406叶片留存量均超过50%,其中JDQY、LF2、HQY叶片脱落最少、形态保持完整,表明其受干旱胁迫影响较小;而QSY、ZHF2和2111叶片脱落率显著高于其他品种,显示对于干旱胁迫更为敏感。值得注意的是,尽管1019和406的叶片留存量较多,但其整体呈现萎蔫状态。结合株高与地径增长数据,二者生长受干旱抑制程度最大,如图2所示。

中度干旱胁迫下,各品种叶片均完全脱落。由图2可知,株高增长量最高的为2111,涨幅为21.98 cm,其次为JDQY和YZY,涨幅分别为18.00、17.69 cm,而406、1019、LF2、ZHF株高增长量最少,涨幅分别为10.80、10.56、10.15、9.42 cm。地径增长量方面,JDQY表现最优,显著高于其他品种($P < 0.05$),而406的地径增长量仅为0.17 cm,显著低于其他品种。综上所述,在中度干旱胁迫下,JDQY通过维持较高的株高和地径增长能力,表现出较强的抗旱性;而406在2种干旱处理下均呈现显著的生长抑制,表明其对于干旱胁迫最为敏感。

2.2 干旱胁迫对不同品种杨树叶片含水率的影响

由图3可知,在正常供水(CK)条件下,9个杨树品种叶片含水率无显著差异($P \geq 0.05$)。在轻度干旱处

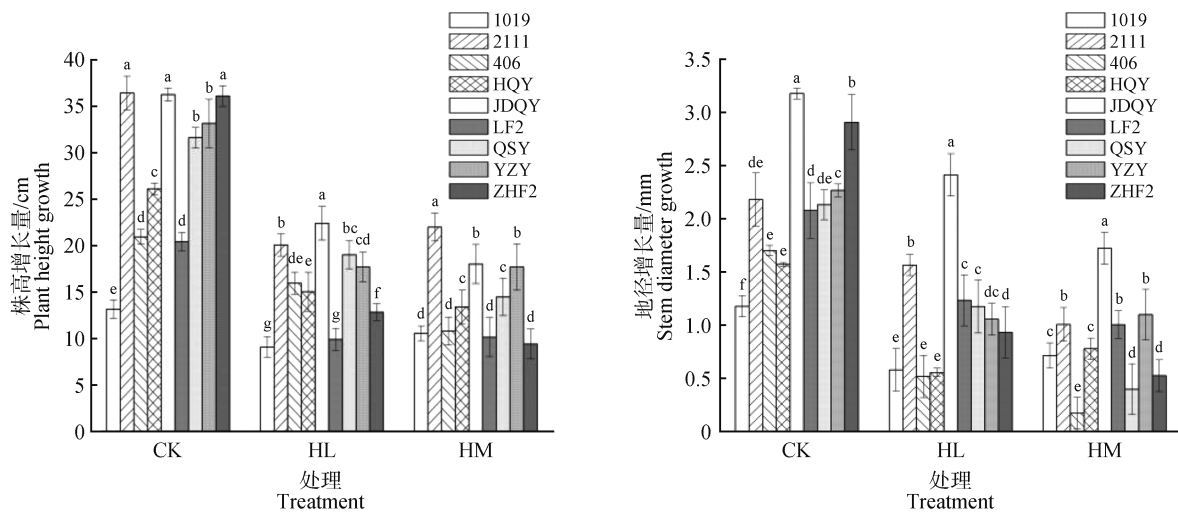


CK: 对照; HL: 轻度干旱胁迫; HM: 中度干旱胁迫; 1: 基地种源青杨; 2: 中黑防杨 2 号; 3: 黑防 3 号杨; 4: 齐林 1 号杨; 5: 1019 号杨; 6: 黑青杨; 7: 龙丰 2 号杨; 8: 银中杨; 9: 带岭×欧 406 号杨。

CK: control; HL: mild drought stress; HM: moderate drought stress. 1: JDQY; 2: ZHF2; 3: QSY; 4: 2111; 5: 1019; 6: HQY; 7: LF2; 8: ZYZ; 9: 406.

图 1 干旱胁迫后各品种杨树表观形态

Fig. 1 Apparent morphology of each poplar varieties after drought stress



(a) 株高增长量
(a) Plant height growth

(b) 地径增长量
(b) Stem diameter growth

图柱上不同小写字母表示同一处理不同品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters on the bars of the graph indicate significant differences between different varieties of the same treatment ($P < 0.05$).

图 2 干旱胁迫后各品种杨树生长量

Fig. 2 Growth of each poplar varieties after drought stress

理下, HQY 叶片含水率变化最小, 降幅仅为 1%, 表明其具有较强的水分保持能力; 而 2111 的叶片含水率变化最大, 降幅为 34%, 显著高于其他品种 ($P < 0.05$)。在中度干旱处理下, JDQY 叶片含水率降幅最小

(12%), 进一步验证其抗旱优势; ZHF2 叶片含水率降幅最大(35%), 显著高于其他品种 ($P < 0.05$)。上述结果表明, 叶片含水率的变化可作为评价杨树抗旱性的重要指标, 且 JDQY 和 HQY 在此项指标中表现突出。

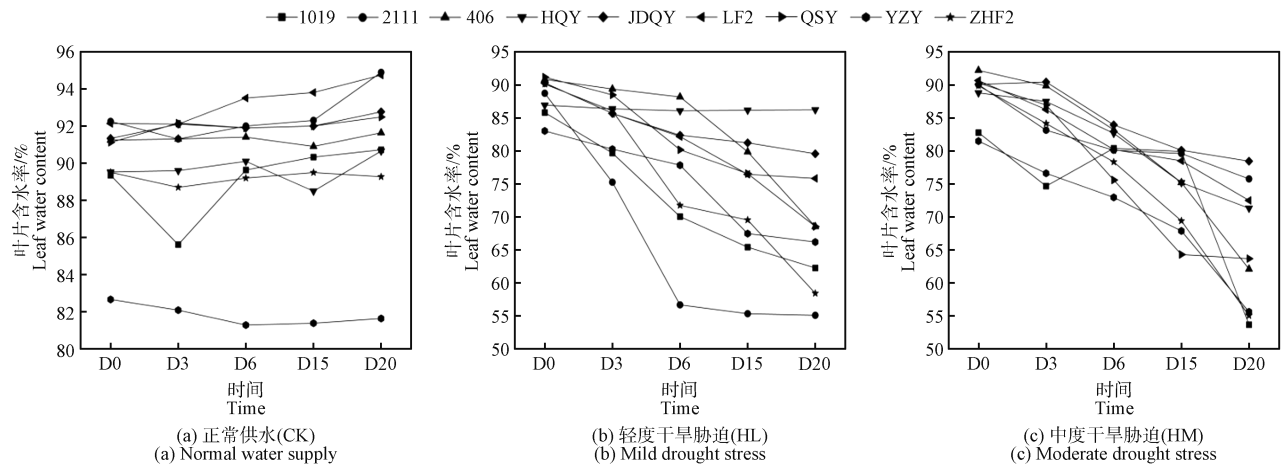


图3 干旱胁迫下各品种杨树叶片含水率

Fig. 3 Leaf water content of each poplar varieties under drought stress

2.3 干旱胁迫对各品种杨树复水后存活率的影响

复水试验结果见表2, 轻度干旱胁迫(HL)下, 各杨树品种复水后存活率均较高(67%~100%)。其中HQY、1019、QSY、YZY和ZHF2的存活率均达100%, 而406的存活率最低(67%)。中度干旱胁迫(HM)下, HQY的存活率仍保持100%, 显著高于其他品种 ($P < 0.05$); 而1019和406的存活率分别降至33%和22%, 表明其恢复能力较弱。

表2 干旱胁迫后各品种杨树复水后存活率
Tab. 2 Survival rate of each poplar varieties after rewatering after drought stress

品种 Variety	处理/% Treatment	
	HL	HM
1019	100	33
2111	92	75
406	67	22
HQY	100	100
JDQY	83	75
LF2	80	70
QSY	100	83
YZY	100	67
ZHF2	100	92

2.4 干旱胁迫对不同品种杨树叶绿素相对含量的影响

由表3可知, 轻度干旱处理下, 与对照相比, 1019叶绿素相对含量下降幅度最大, 显著下降43.98%; 而QSY的降幅最小(1.55%), 且未达显著水平 ($P \geq 0.05$)。中度干旱处理下, 与对照相比, 1019叶绿素相对含量进一步下降58.46% ($P < 0.05$), 而JDQY下降幅度最小(22.11%), 且与CK无显著差异 ($P \geq 0.05$)。

2.5 干旱胁迫对不同品种杨树气孔表型的影响

由表4可知, 与对照相比, 在轻度干旱处理下, 除JDQY外, 各品种气孔长度和宽度均呈现显著下降趋势 ($P < 0.05$)。其中, QSY气孔长度下降幅度最大, 为19.09%, 而HQY下降幅度最小, 为8.96%; 气孔宽度HQY下降幅度最大, 为35.68%, 2111下降幅度最小, 为18.86%。随着胁迫程度加剧, 中度干旱处理导致所有品种气孔长度均显著降低, 其中, QSY下降幅度最大, 为31.21%, HQY下降幅度最小, 为17.79%; 气孔宽度降幅范围扩大至21.23%(LF2)~42.43%(1019)。

2.6 干旱胁迫对不同品种杨树离子质量浓度的影响

由表5可知, 干旱胁迫显著影响各品种离子平衡。轻度干旱处理下, 除2111的 Ca^{2+} 、 K^+ 质量浓度以及1019、406、YZY的 K^+ 质量浓度外, 各品种杨树 Ca^{2+} 和 K^+ 质量浓度普遍升高, 增幅以JDQY最为显著, 分别增加

表 3 干旱胁迫后各品种杨树叶绿素相对含量
Tab. 3 Relative chlorophyll content of each poplar varieties after drought stress

品种 Variety	处理 Treatment	叶绿素/SPAD Chlorophyll	品种 Variety	处理 Treatment	叶绿素/SPAD Chlorophyll
1019	CK	33.56 ± 5.59a	LF2	CK	35.46 ± 4.06a
	HL	18.80 ± 11.53b		HL	25.40 ± 12.73a
	HM	13.94 ± 8.06b		HM	25.30 ± 11.79a
2111	CK	36.33 ± 4.42a	QSY	CK	28.47 ± 3.79a
	HL	28.93 ± 6.97ab		HL	28.03 ± 2.99a
	HM	25.31 ± 10.85b		HM	21.19 ± 9.82a
406	CK	29.30 ± 3.56a	YZY	CK	26.87 ± 2.25a
	HL	21.18 ± 7.40b		HL	19.62 ± 6.38ab
	HM	14.47 ± 6.03c		HM	16.94 ± 9.81b
HQY	CK	32.33 ± 1.72a	ZHF2	CK	34.68 ± 3.29a
	HL	23.15 ± 3.36b		HL	26.00 ± 6.83b
	HM	20.16 ± 9.72b		HM	25.63 ± 5.73b
JDQY	CK	33.74 ± 3.19a			
	HL	29.70 ± 11.27b			
	HM	26.28 ± 3.07b			

注:表中不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences between treatments of the same variety ($P < 0.05$).

表 4 干旱胁迫后各品种杨树气孔表型
Tab. 4 Stomatal phenotypes of each poplar varieties after drought stress

品种 Variety	处理 Treatment	气孔长/ μm Stomatal length	气孔宽/ μm Stomatal width	品种 Variety	处理 Treatment	气孔长/ μm Stomatal length	气孔宽/ μm Stomatal width
1019	CK	21.72 ± 1.33a	9.71 ± 1.21a	JDQY	CK	20.32 ± 1.62a	7.62 ± 1.34a
	HL	18.31 ± 1.21b	6.39 ± 0.58b		HL	19.06 ± 1.63a	7.41 ± 1.17a
	HM	15.38 ± 0.79c	5.59 ± 0.36c		HM	15.51 ± 1.17b	5.39 ± 1.37b
2111	CK	24.21 ± 1.69a	8.96 ± 0.89a	LF2	CK	26.43 ± 1.14a	9.94 ± 0.93a
	HL	20.71 ± 1.16b	7.27 ± 0.53b		HL	21.45 ± 1.34b	7.41 ± 0.83b
	HM	17.88 ± 2.30c	6.72 ± 1.18b		HM	18.54 ± 0.54c	7.83 ± 1.21b
406	CK	22.51 ± 1.31a	10.27 ± 2.17a	QSY	CK	25.41 ± 1.83a	8.94 ± 0.75a
	HL	18.56 ± 0.73b	7.80 ± 1.14b		HL	20.56 ± 2.54b	7.13 ± 1.48b
	HM	15.98 ± 1.06c	6.04 ± 1.49b		HM	17.48 ± 1.68c	6.35 ± 1.29c
HQY	CK	22.65 ± 1.57a	11.10 ± 1.00a	ZHF2	CK	19.88 ± 0.74a	8.60 ± 1.68a
	HL	20.62 ± 0.51b	7.14 ± 0.60c		HL	16.31 ± 0.73b	5.64 ± 1.11b
	HM	18.62 ± 0.65c	8.69 ± 1.03b		HM	14.52 ± 0.59c	5.30 ± 0.66b

注:表中不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences between treatments of the same variety ($P < 0.05$).

4.021 mg/L和4.421 mg/L,而Mg²⁺和Na⁺质量浓度无显著变化。中度干旱处理下,各品种杨树Ca²⁺和K⁺质量浓度均显著积累,其中JDQY增幅最大,分别增加

11.645 mg/L和11.104 mg/L;YZY增幅最小,分别为2.416 mg/L和0.589 mg/L。Mg²⁺和Na⁺质量浓度仍维持相对稳定。

表5 干旱胁迫后各品种杨树离子质量浓度
Tab. 5 Ion content of each poplar varieties after drought stress

品种 Variety	处理 Treatment	Ca ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Na ⁺	品种 Variety	处理 Treatment	Ca ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Na ⁺
1019	CK	18.070	19.438	2.838	0.215	LP2	CK	18.741	17.201	3.590	0.298
	HL	19.366	19.268	2.064	0.296		HL	21.729	20.244	3.203	0.200
	HM	21.021	22.976	2.006	0.290		HM	23.891	26.624	3.579	0.298
2111	CK	19.695	8.734	3.238	0.214	QSY	CK	13.386	13.451	3.665	0.193
	HL	19.551	8.564	3.079	0.218		HL	17.268	15.490	3.379	0.271
	HM	22.263	11.610	3.164	0.206		HM	22.540	23.029	3.438	0.341
406	CK	20.216	15.844	3.494	0.226	YZY	CK	17.298	16.643	3.358	0.249
	HL	22.615	15.755	3.120	0.195		HL	18.261	16.414	3.363	0.246
	HM	25.134	16.814	3.110	0.194		HM	19.714	17.231	3.586	0.254
HQY	CK	12.625	17.006	3.280	0.265	ZHF2	CK	14.705	17.839	3.161	0.201
	HL	15.064	20.228	3.451	0.205		HL	15.391	18.888	3.259	0.198
	HM	19.484	22.479	2.920	0.358		HM	18.488	20.105	3.078	0.221
JDQY	CK	12.188	15.255	3.723	0.198						
	HL	16.209	19.676	3.273	0.225						
	HM	23.833	26.359	3.201	0.386						

2.7 干旱胁迫对不同品种杨树丙二醛(MDA)质量摩尔浓度的影响

丙二醛质量摩尔浓度是反应生物膜受到胁迫伤害程度的重要指标,质量摩尔浓度越高表示受到伤害的程度越大^[18]。由图4可知,在正常水分条件下,各品种杨树MDA质量摩尔浓度随时间的推移变化不明显。

干旱胁迫显著诱导MDA积累,其质量摩尔浓度随处理时间延长持续升高,并于D20达到峰值。轻度干旱胁迫下,ZHF2的MDA质量摩尔浓度增幅最大,为7.15倍,LF2增幅最小,为1.99倍。中度干旱胁迫进一步加剧该趋势,ZHF2和LF2增幅分别达9.33倍和2.9倍。

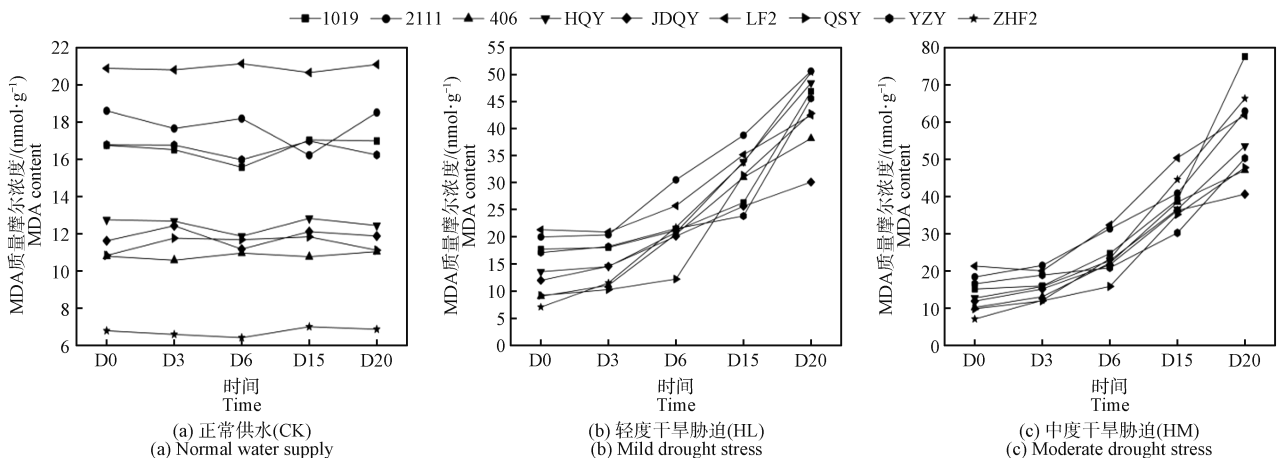


图4 干旱胁迫下各品种杨树丙二醛质量摩尔浓度

Fig. 4 Malondialdehyde content of each poplar varieties under drought stress

2.8 干旱胁迫对不同品种杨树超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

SOD 作为关键抗氧化酶,通过清除氧自由基发挥细胞保护作用^[19]。由图 5 可知,在正常供水情况下,各

品种杨树 SOD 活性保持稳定。干旱胁迫下 SOD 活性呈现先激活后抑制的动态变化,D6 时达到峰值。轻度干旱处理下,HQY 酶活性最高,YZY 最低;中度干旱胁迫下 HQY 与 JDQY 均保持最高活性,YZY 仍为最低。

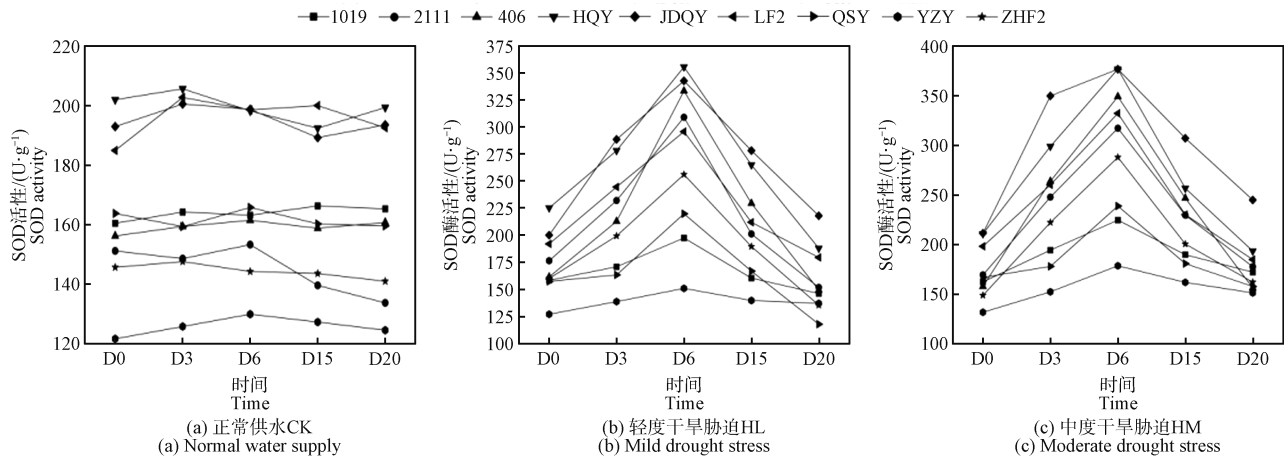


图 5 干旱胁迫下各品种杨树超氧化物歧化酶活性

Fig. 5 Superoxide dismutase activity of each poplar varieties under drought stress

2.9 隶属函数法对不同杨树品种的耐旱性综合评价

利用 SPSS 软件对 9 个品种杨树在轻度、中度干旱胁迫下的 14 个指标分别进行主成分分析,见表 6—表 9。在轻度干旱胁迫下,前 5 个主成分的特征值分别是 5.364、2.514、2.136、1.685、0.797,贡献率分别为

38.317%、17.956%、15.257%、12.039%、5.696%,累积贡献率达 89.265%。根据综合评价公式分别计算出 9 个品种的 D_i , D_i 越大,则代表该品种的抗旱能力越强。由表 7 可知,9 个品种杨树在轻度干旱胁迫下的抗旱性由大到小排序为 JDQY、HQY、QSY、YZY、LF2、2111、406、ZHF2、1019。由表 8 可知,在中度干旱胁迫下,前

表 6 轻度干旱胁迫各综合指标的系数及贡献率

Tab. 6 Coefficients and contribution of each composite indicator of mild drought stress

指标 Index	株高/cm Plant height	地径/mm Stem diameter	叶绿素含量/SPAD Chlorophyll content	MDA 质量摩尔浓度/ (nmol·g ⁻¹) Malondialdehyde content	SOD 活性/(U·g ⁻¹) Superoxide dismutase activity	叶片含水率/% Leaf water content	气孔长/μm Stomatal length	气孔宽/μm Stomatal width	存活率/% Survival rate	
主成分 Principal component	PC1	0.106	0.147	0.117	0.145	0.094	0.115	0.146	0.169	-0.072
	PC2	0.215	0.095	0.105	-0.134	-0.173	-0.032	0.085	0.032	0.313
	PC3	-0.068	-0.185	-0.064	-0.110	0.118	0.299	0.015	-0.149	0.007
	PC4	-0.240	-0.130	-0.278	0.131	-0.344	0.255	0.040	0.009	0.162
	PC5	0.524	-0.279	-0.491	-0.045	0.253	0.121	0.137	0.047	-0.415

指标 Index	旱害指数 Drought damage index	Ca 质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Calcium content	K 质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Potassium content	Mg 质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Magnesium content	Na 质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Sodium content	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
主成分 Principal component	PC1	0.018	0.131	0.153	-0.028	-0.017	5.364	38.317
	PC2	0.319	-0.039	0.018	0.194	0.188	2.514	17.956
	PC3	0.181	0.077	0.169	0.320	-0.343	2.136	15.257
	PC4	0.106	0.285	0.139	-0.270	0.170	1.685	12.039
	PC5	0.36	0.109	-0.431	-0.109	0.220	0.797	5.696

5个主成分的特征值分别是5.703、2.206、1.778、1.562、1.189,贡献率分别为40.736%、15.754%、12.702%、11.157%、8.494%,PC5累计贡献率达88.843%。由表9可知,9个品种杨树在中度干旱胁迫

下的抗旱性由大到小排序为JDQY、HQY、2111、YZY、LF2、QSY、ZHF2、406、1019。 D 分析表明,JDQY在2种胁迫强度下均表现出最强耐旱性,而1019始终为最敏感品种。

表7 轻度干旱胁迫各品种的综合指标值、归一化主成分得分、 D 及耐旱性排序

Tab. 7 Composite index values, normalized principal component score, D and drought tolerance ranking of each poplar varieties under mild drought stress

品种 Variety	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$	D	排序 Ranking
1019	-1.018	-0.481	-1.318	1.543	-0.060	0.000	0.398	0.000	1.000	0.429	0.242	9
2111	-0.233	0.425	-0.771	-1.874	-0.108	0.230	0.723	0.158	0.000	0.415	0.298	6
406	-0.207	-1.591	0.173	-0.642	1.828	0.238	0.000	0.430	0.361	1.000	0.288	7
HQY	0.146	0.543	2.146	0.341	0.214	0.342	0.765	1.000	0.648	0.512	0.592	2
JDQY	2.389	0.196	-0.765	0.147	0.098	1.000	0.641	0.159	0.592	0.477	0.696	1
LF2	0.315	-1.504	0.594	0.408	-1.480	0.391	0.031	0.552	0.668	0.000	0.359	5
QSY	0.046	1.197	-0.265	0.638	0.098	0.312	1.000	0.304	0.735	0.477	0.517	3
YZY	-0.688	0.989	0.152	0.362	0.756	0.097	0.925	0.424	0.655	0.676	0.432	4
ZHF2	-0.749	0.225	0.054	-0.923	-1.347	0.079	0.651	0.396	0.278	0.040	0.273	8

注: X_1 — X_5 为各主成分得分; $U(X_1)$ — $U(X_5)$ 为各主成分得分经隶属函数法处理后的归一化值(隶属函数值)。

Note: X_1 — X_5 are the principal component scores; $U(X_1)$ — $U(X_5)$ are the normalized values (membership function values) of the principal component scores processed by the membership function method.

表8 中度干旱胁迫各综合指标的系数及贡献率

Tab. 8 Coefficients and contribution of each composite indicator of moderate drought stress

指标 Index	株高/cm Plant height	地径/mm Stem diameter	叶绿素 含量/SPAD Chlorophyll content	MDA质量摩尔浓度/ (nmol·g ⁻¹) Malondialdehyde content	SOD活性/(U·g ⁻¹) Superoxide dismutase activity	叶片含水率/% Leaf water content	气孔长/μm Stomatal length	气孔宽/μm Stomatal width	存活率/% Survival rate
主成分 Principal component	PC1	0.073	0.115	0.134	0.096	0.057	0.146	0.057	0.105
	PC2	0.228	0.097	0.167	0.043	0.059	0.112	-0.017	0.149
	PC3	0.057	0.041	-0.151	0.145	0.372	0.159	0.392	-0.104
	PC4	0.365	0.26	-0.237	0.399	-0.304	-0.011	-0.176	-0.221
	PC5	0.111	0.152	-0.007	-0.173	-0.345	-0.272	0.476	0.467
指标 Index	旱害指数 Drought damage index	Ca质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Calcium content	K质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Potassium content	Mg质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Magnesium content	Na质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Sodium content	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate	
主成分 Principal component	PC1	-0.110	0.139	0.148	-0.003	0.118	5.703	40.736	40.736
	PC2	0.145	-0.217	-0.168	0.376	-0.274	2.206	15.754	56.490
	PC3	0.343	0.062	-0.143	-0.204	-0.020	1.778	12.702	69.192
	PC4	0.100	0.059	-0.003	0.030	0.127	1.562	11.157	80.349
	PC5	0.093	-0.050	-0.138	0.017	0.295	1.189	8.494	88.843

3 讨论

水分是植物赖以生存的必要条件,当植物遭受到干旱胁迫时,最直观的表现就是表观形态的变化。这

包括叶片逐渐萎蔫、变黄甚至全部脱落,直至停止生长^[20]。试验结果表明,不同品种杨树的表观形态在干旱胁迫下存在显著差异,例如JDQY,其在株高、地径和旱害指数等多个指标均表现出较强的抗旱性,表明其

表 9 中度干旱胁迫各品种的综合指标值、归一化主成分得分、 D 及耐旱性排序Tab. 9 Composite index values, normalized principal component score, D and drought tolerance ranking of each poplar varieties under moderate drought stress

品种 Variety	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$	D	排序 Ranking
1019	-1.152	-1.549	-0.197	0.245	0.430	0.005	0.000	0.424	0.568	0.735	0.204	9
2111	0.271	1.619	0.063	0.001	-0.381	0.467	1.000	0.511	0.497	0.451	0.570	3
406	-1.166	-0.327	1.302	0.040	-1.669	0.000	0.386	0.929	0.509	0.000	0.265	8
HQY	0.432	0.049	1.511	-0.824	1.189	0.519	0.504	1.000	0.260	1.000	0.599	2
JDQY	1.914	-0.687	0.671	0.838	-0.017	1.000	0.272	0.717	0.738	0.578	0.757	1
LF2	0.478	0.455	-0.967	-0.644	-1.347	0.534	0.633	0.164	0.312	0.113	0.430	5
QSY	0.501	-0.921	-1.453	0.324	-0.024	0.541	0.198	0.000	0.590	0.575	0.413	6
YZY	-0.857	1.136	-0.311	1.747	0.932	0.100	0.848	0.385	1.000	0.910	0.464	4
ZHF2	-0.420	0.224	-0.620	-1.728	0.887	0.242	0.560	0.281	0.000	0.894	0.336	7

注: X_1 — X_5 为各主成分得分; $U(X_1)$ — $U(X_5)$ 为各主成分得分经隶属函数法处理后的归一化值(隶属函数值)。

Note: X_1 — X_5 are the principal component scores; $U(X_1)$ — $U(X_5)$ are the normalized values (membership function values) of the principal component scores processed by the membership function method.

在干旱环境下仍能保持较好的生长状态。蔡静如等^[21]等得出植株在遭受干旱胁迫时,叶片相对含水率是响应最为敏感的生理指标之一,而这一指标与气孔、离子调节等密切相关。在本研究中,HQY和JDQY分别在HL和HM处理下拥有更高的叶片含水量,尤其是JDQY,与其在表观形态方面表现一致,进一步印证了其较强的抗旱性。气孔开度对光合作用的调节起着重要的作用。有研究表明^[22-23],干旱胁迫下植物通常主动调节气孔以减少水分流失,但同时也会限制 CO_2 进入,抑制光合作用的碳同化过程。干旱胁迫初期光合速率下降主要受到“气孔限制”的作用,因此具备较强气孔调节能力的品种,在干旱条件下通过维持适度的气孔开放,从而在胁迫中保持更高的光合作用水平。在本研究中,HQY和2111的气孔开度变化最小,同时表现出较高的叶绿素相对含量和生长相关指标,说明其在干旱胁迫下能够有效调节气孔,减少气孔限制对光合作用的影响。齐鸣等^[24]研究认为,植株在受到干旱胁迫时,叶绿素相对含量越稳定,说明了其抗干旱胁迫能力越强,受外界影响的波动越小。这与本研究中QSY和LF2的表现相符,说明其在胁迫下表现了更稳定的光合作用能力。矿物质元素离子的调节能力在植物的抗逆性中也起到重要的作用。朱桐等^[25]研究指出,植株通过调节体内的各种矿物质离子质量浓度的平衡来适应干旱环境,干旱胁迫处理迫使杨树体内 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 3种离子质量浓度上升, Mg^{2+} 质量浓度下降。在本研究中JDQY在干旱胁迫下, K^+ 、 Ca^{2+} 质量浓度明显升高。有研究表明^[26-27],植物在干旱胁迫下通常通过积累无机离子(K^+ 、 Ca^{2+} 等)来维持细胞渗透势

和水分平衡。其中, K^+ 能够促进气孔关闭、增强细胞渗透调节能力,从而减少水分散失;而 Ca^{2+} 不仅参与胞内信号转导过程,还是调控抗氧化系统和脱落酸信号通路的关键因子,有助于提高植物对胁迫的应答速度;最终帮助其维持细胞内渗透平衡,与其前些指标表现一致。梁青兰等^[28]认为,丙二醛(MDA)是膜脂氧化的最终产物,其会干预生物膜的功能与结构,最终对植株产生毒性。这与本研究的各品种MDA质量摩尔浓度均升高的结果相符,其中LF2的升高量最低,表明其膜脂抗氧化性最强,可以有效抵御氧化损伤。此外,井大炜等^[29]研究发现的在干旱胁迫下杨树苗的叶片SOD活性随时间推移呈现出先升高后降低的趋势,也与本实验结果相符,其中HQY和JDQY的活性表现突出,峰值更为显著。这表明其有更强的抗氧化能力,也符合多项指标中的优异表现。此外,相较于轻度胁迫,中度胁迫下的2111抗旱性排名表现更好,可能与其启动了更强的胁迫响应系统有关。试验结果表明,中度干旱胁迫下2111气孔调节能力更强,保证了光合作用中碳的固定;另一方面,表现出更高的SOD活性,说明中度干旱胁迫下更能激活其抗氧化系统,使其具备更强的适应能力。

4 结论

本研究基于主成分分析(PCA)和隶属函数法,对9个杨树品种在轻度(HL)和中度(HM)干旱胁迫下的14项指标进行综合评价^[31]。结果表明,1)轻度干旱处理下抗旱性由大到小排序为JDQY、HQY、QSY、YZY、LF2、2111、406、ZHF2、1019;2)中度干旱处理下由大到小排序为JDQY、HQY、2111、YZY、LF2、QSY、ZHF2、

406、1019。值得注意的是,JDQY与HQY在2种胁迫梯度下均稳居前两位,显示其广谱抗旱特性,而1019始终表现为最敏感品种。通过对当前9个主栽杨树品种梯度干旱胁迫试验,明确黑龙江省9个杨树品种的抗旱性差异及生理响应机制,并分别设置轻度和中度干旱胁迫两种处理,可以适用于不同水分条件造林地,同时筛选出基地种源青杨、黑青杨等综合抗旱性强的品种,对杨树抗逆性育种以及田间管理等方面提供科学依据,为干旱立地造林树种选择提供参考价值。

参 考 文 献

- [1] 陈皇池,袁淑杰,李尚锋,等. 1961—2020年中国东北地区冬季气温变化特征分析[J]. 气象灾害防御, 2025, 32(1): 26-31.
CHEN H C, YUAN S J, LI S F, et al. Analysis of winter temperature variation characteristics in Northeast China from 1961 to 2020[J]. Meteorological Disaster Prevention, 2025, 32(1): 26-31.
- [2] 孙凤华,任国玉,赵春雨,等. 中国东北地区及不同典型下垫面的气温异常变化分析[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 167-171.
SUN F H, REN G Y, ZHAO C Y, et al. An analysis of temperature abnormal change in Northeast China and type underlying surface[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(2): 167-171.
- [3] 孙凤华,杨素英,陈鹏狮. 东北地区近44年的气候暖干化趋势分析及可能影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 751-755, 762.
SUN F H, YANG S Y, CHEN P S. Climatic warming-drying trend in Northeastern China during the last 44 years and its effects[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 751-755, 762.
- [4] 孙凤华,杨修群,路爽,等. 东北地区平均、最高、最低气温时空变化特征及对比分析[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 157-163.
SUN F H, YANG X Q, LU S, et al. The contrast analysis on the average and extremum temperature trend in Northeast China[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2006, 26(2): 157-163.
- [5] 孙凤华,袁健,路爽. 东北地区近百年气候变化及突变检测[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(1): 101-108.
SUN F H, YUAN J, LU S. The change and test of climate in Northeast China over the last 100 years[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(1): 101-108.
- [6] 吴诗婷,王国兵,杨立青,等. 干旱对森林生态系统结构及功能的影响研究进展[J]. 世界林业研究, 2024, 37(4): 37-45.
WU S T, WANG G B, YANG L Q, et al. Impacts of drought on forest ecosystem structure and function: A review of research progress[J]. World Forestry Research, 2024, 37(4): 37-45.
- [7] 董世林,王战. 中国杨树地理分布规律的研究[J]. 生态学杂志, 1988, 7(6): 12-18.
DONG S L, WANG Z. Geographical distribution pattern of *Populus* in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 1988, 7(6): 12-18.
- [8] 樊荣,孙慧彦,刘艳平,等. 树木对水分胁迫响应机理研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30(3): 281-286.
FAN R, SUN H Y, LIU Y P, et al. A current research on the trees's reponse mechanism to the water stress[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 30(3): 281-286.
- [9] 户连荣,郎南军,郑科. 植物抗旱性研究进展及发展趋势[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(7): 2652-2654.
HU L R, LANG N J, ZHENG K. Research progress on the drought resistance of plants and its development trend[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(7): 2652-2654.
- [10] 杨传宝,姚俊修,李善文,等. 白杨派无性系苗期对干旱胁迫的生长生理响应及抗旱性综合评价[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(5): 58-66.
YANG C B, YAO J X, LI S W, et al. Growth and physiological responses to drought stress and comprehensive evaluation on drought tolerance in *Leuce* clones at nursery stage[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(5): 58-66.
- [11] 王青梅. 施肥对大青杨原料林生长的影响[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2013, 26(2): 18-20.
WANG Q M. Effect of fertilization on the growth of *Populus davidiana* raw material forest[J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering, 2013, 26(2): 18-20.
- [12] 李颖慧,孙墨可,李建波,等. 干旱胁迫对籽用西瓜幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(7): 161-165.
LI Y H, SUN M K, LI J B, et al. Effect of drought stress on seeding growth of seed watermelon[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(7): 161-165.
- [13] 郑涛. 白杨、美洲黑杨无性系抗旱性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
ZHENG T. Study on drought resistance of poplar and *Populus deltoides* clones[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [14] 郭燕,张树航,李颖,等. 中国板栗238份品种(系)叶片

- 形态、解剖结构及其抗旱性评价[J]. 园艺学报, 2020, 47(6): 1033-1046.
- GUO Y, ZHANG S H, LI Y, et al. Studies on the leaf morphology, anatomical structure and drought resistance evaluation of 238 Chinese chestnut varieties (strains)[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(6): 1033-1046.
- [15] 雷晓强, 王竞红, 杨成武, 等. 干旱胁迫下三种护坡植物种子萌发特性研究[J]. 森林工程, 2015, 31(3): 7-11.
- LEI X Q, WANG J H, YANG C W, et al. Study on drought resistance of three woody plants during the seed germination[J]. Forest Engineering, 2015, 31(3): 7-11.
- [16] 高利英, 邓永胜, 王晓歌, 等. 不同棉花品种种子萌发期耐旱性综合评价[J]. 山东农业科学, 2023, 55(4): 34-41.
- GAO L Y, DENG Y S, WANG X G, et al. Evaluation on drought resistance of different cotton varieties at germination stage [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(4): 34-41.
- [17] 田小霞, 卫晓锋, 魏浩, 等. 6种牧草苗期耐旱性综合评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 978-985.
- TIAN X X, WEI X F, WEI H, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of six forage species at the seedling stage[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 978-985.
- [18] MA J, DU G Y, LI X H, et al. A major locus controlling malondialdehyde content under water stress is associated with *Fusarium* crown rot resistance in wheat [J]. Molecular Genetics and Genomics, 2015, 290(5): 1955-1962.
- [19] GUO J N, ZHAO Y P, YANG Y Z, et al. Roles of superoxide dismutase in plant response to drought, salinity and cold stress [J]. Bulletin of Botanical Research, 2024, 44(4): 481-490.
- [20] 童琪, 王陈, 周鑫伟, 等. 干旱胁迫对锥栗幼苗生理特征的影响[J]. 现代农业研究, 2024, 30(9): 72-75.
- TONG Q, WANG C, ZHOU X W, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics in *Castanea henryi* (Skan) Rehd. et Wils. seedlings [J]. Modern Agriculture Research, 2024, 30(9): 72-75.
- [21] 蔡静如, 钱璐璜, 雷江丽. 5种乡土灌木对模拟干旱胁迫的生理响应[J]. 江西农业学报, 2015, 27(2): 30-36.
- CAI J R, QIAN T H, LEI J L. Physiological responses of five native wild shrubs to PEG drought stress [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, 27(2): 30-36.
- [22] 王珣, 杨小龙, 叶子飘, 等. 不同温度下甜高粱叶片光合作用的气孔限制和非气孔限制特征分析[J]. 植物生理学报, 2022, 58(7): 1245-1253.
- WANG X, YANG X L, YE Z P, et al. Stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis in *Sorghum bicolor* at different temperatures [J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(7): 1245-1253.
- [23] LAWSON T, BLATT M R. Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency [J]. Plant Physiology, 2014, 164(4): 1556-1570.
- [24] 齐鸣, 王俊, 张明, 等. 5种杜鹃对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 江西农业学报, 2022, 34(10): 52-58.
- QI M, WANG J, ZHANG M, et al. Physiological response to drought stress and drought resistance evaluation of five *Azalea* varieties [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(10): 52-58.
- [25] 朱桐, 金华, 邹吉祥, 等. 干旱胁迫下不同品种杨树矿质离子含量变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(2): 102-107.
- ZHU T, JIN H, ZOU J X, et al. Changes of mineral ion content of different varieties of poplar under drought stress [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(2): 102-107.
- [26] SANDERS D, PELLOUX J, BROWNLEE C, et al. Calcium at the crossroads of signaling [J]. The Plant Cell, 2002, 14(suppl): S401-S417.
- [27] XIONG L, ZHU J K. Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2): 131-139.
- [28] 梁青兰, 韩友吉, 乔艳辉, 等. 干旱胁迫对黑杨派无性系生长及生理特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 81-89.
- LIANG Q L, HAN Y J, QIAO Y H, et al. Effects of drought stress on the growth and physiological characteristics of Sect. *Aigeiros* clones [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 81-89.
- [29] 井大炜. 杨树苗叶片光合特性和抗氧化酶对干旱胁迫的响应[J]. 核农学报, 2014, 28(3): 532-539.
- JING D W. Response of photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in poplar seedlings to drought stress [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(3): 532-539.
- [30] 韩春丽, 卫星, 韦庆钰, 等. 不同生境水曲柳种子的形态结构及抗旱性分析[J]. 森林工程, 2024, 40(3): 88-100.
- HAN C L, WEI X, WEI Q Y, et al. Analysis of morphological structure and drought resistance of *Fraxinus mandshurica* seeds in different habitats [J]. Forest Engineering, 2024, 40(3): 88-100.
- [31] 李王胜, 王雪倩, 尹希龙, 等. 甜菜种质资源苗期耐旱性综合评价[J]. 作物杂志, 2022(6): 54-60.
- LI W S, WANG X Q, YIN X L, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of sugar beet germplasms at seedling stage [J]. Crops, 2022(6): 54-60.