

喀斯特煤矸石山优势植物叶片解剖结构及其抗旱性研究

杨再超¹, 张政², 安栩立², 张芸熙², 徐芳²

(1.六盘水师范学院 生物科学与技术学院, 贵州 六盘水 553004;

2.青海大学 农牧学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 筛选适用于喀斯特煤矸石山生态修复的强抗旱植物, 为矿区生态改善提供支撑。以贵州省六盘水喀斯特煤矸石山的优势植物为研究对象, 通过石蜡切片法观察叶片解剖结构, 测定叶片抗旱功能指标, 结合主成分分析和隶属函数法综合评价其抗旱性。研究结果表明: 喀斯特煤矸石山的优势植物抗旱性综合排序为戟叶酸模 > 两头毛 > 亮叶桦 > 野艾蒿 > 葛 > 鬼针草 > 醉鱼草, 这7种植物抗旱性均为Ⅲ级中抗水平。戟叶酸模凭借厚角质层、发达表皮及高紧密度等解剖特征与生理调节协同优势, 抗旱性最优。而且, 主成分分析证实叶片解剖结构(角质层、表皮厚度等)和抗旱生理指标(还原糖、脯氨酸含量等)是影响植物抗旱性的关键因素。综合分析得知, 戟叶酸模为喀斯特煤矸石山生态修复优选物种, 两头毛、亮叶桦可作为辅助修复植物。

关键词: 煤矸石; 叶片解剖结构; 抗旱指标; 隶属函数法; 戟叶酸模

中图分类号: Q944.5

文献标识码: A

文章编号: 1671-055X(2025)06-0001-08

干旱胁迫作为制约植物生长与地理分布的关键非生物逆境因子, 直接影响生态系统的稳定性与功能发挥。植物在长期干旱适应中形成的特异性叶片结构(如角质层、叶肉组织特化等)与生理代谢机制(如渗透调节物质积累), 是其抵御干旱的关键策略。而叶片作为光合作用、蒸腾作用及水分交换的核心器官, 其结构与生理指标已成为评价植物抗旱性的重要依据。近年来, 相关研究已为阐释植物抗逆机理提供了坚实理论基础^[1-3]。喀斯特地区生态系统脆弱, 而煤矸石山是煤矿开采后固体废弃物堆积形成的特殊退化生境, 叠加了岩溶干旱、土壤贫瘠、保水性差及地质灾害风险高等多重压力, 进一步加剧了区域生态退化, 成为西南喀斯特矿区生态修复的重点与难点^[4-6]。目前, 植被恢复是煤矸石山生态修复的核心手段, 筛选适配该生境的强抗旱植物是提升修复成效的关键前提。

国内外学者已围绕植物抗旱指标筛选、抗旱机理及评价方法开展大量研究, 证实了叶片解剖结构、气孔特征、渗透调节物质含量等指标与抗旱性的密切关联, 并建立了隶属函数法等综合评价体系^[7-11], 但相关研究多聚焦于煤矸石山植被恢复技术模式构建, 对该特殊生境下优势植物的抗旱适应性机制缺乏系统解析, 难以明确不同植物的抗旱适应性差异, 导致生态修复中植物筛选缺乏科学依据^[12-13]。

贵州省六盘水市作为西南喀斯特地区重要煤炭产区, 煤矸石山分布广泛, 生态修复需求迫切且极具典型性。基于此, 以六盘水市域内典型煤矸石山上的戟叶酸模、两头毛、亮叶桦等7种优势植物为研究对象, 系统分析叶片解剖结构与抗旱指标特征, 结合隶属函数法综合评价其抗旱性, 旨在揭示优势植物的干旱适应策略, 筛选适配喀斯特煤矸石山的强抗旱修复植物, 为矿区生态修复技术优化与可持续治理提供理论支撑。

收稿日期: 2025-11-10

基金项目: 贵州省普通高等职业院校科技拔尖人才项目“贵州典型煤矸石山植被及土壤生物活力恢复关键技术研究”(黔教合KY字[2017]100号); 贵州省科协决策咨询项目“喀斯特煤矸石山生态修复路径与治理对策研究”。

作者简介: 杨再超, 男, 贵州从江人, 理学博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事植物与土壤生态研究; 张政, 男, 山东定陶人, 主要从事荒漠化防治、生态修复研究; 安栩立, 男, 内蒙古通辽人, 主要从事植物生态研究; 张芸熙, 女, 甘肃民乐人, 主要从事林业生态研究; 徐芳, 女, 青海祁连人, 主要从事植物生态研究。

1 材料与方法

1.1 材料来源及其解剖结构的计算指标

研究材料采自贵州省六盘水市松河乡和汪家寨镇废弃煤矸石山的戟叶酸模、两头毛、亮叶桦等7种优势植物的健康叶片。植物种类鉴定与分类参考《中国植物志》，其分类与生活型如表1所示。

表1 研究所用植物的分类与生活型

编号	科	属	种	生活型
1	豆科 Fabaceae	葛属 <i>Pueraria</i>	葛 <i>Pueraria lobata</i>	粗壮藤本
2	桦木科 Betulaceae	桦木属 <i>Betula</i>	亮叶桦 <i>Betula luminifera</i>	乔木
3	马钱科 Loganiaceae	醉鱼草属 <i>Buddleja</i>	醉鱼草 <i>Buddleja lindleyana</i>	灌木
4	菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i>	草本或亚灌木状
5	菊科 Asteraceae	鬼针草属 <i>Bidens</i>	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	草本
6	蓼科 Polygonaceae	酸模属 <i>Rumex</i>	戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i>	灌木
7	紫葳科 Bignoniaceae	角蒿属 <i>Incarvillea</i>	两头毛 <i>Incarvillea arguta</i>	草本或亚灌木状

采集成熟健康无损的叶片后,立即用FAA固定液保存并带回实验室。运用石蜡切片法对叶片结构进行观察,以主叶脉为中心,在近基部1/3位置切取0.5 cm²样品,通过脱水、透明、浸蜡、包埋、石蜡切片、展片、脱蜡及复水、染色、封片制作装片后,置于OLYMPUS CX31光学显微镜下观察,用Image-Pro Plus 6.0软件依次测量上下表皮厚度、角质层厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶片厚度,各指标重复测量9次,计算栅海比、紧密度、疏松度^[14],计算方法见式(1)~式(3):

$$Q_{PS} = \frac{T_{\text{栅栏}}}{T_{\text{海绵}}} \quad (1)$$

$$Q_{CTR} = \frac{T_{\text{栅栏}}}{T_{\text{叶片}}} \quad (2)$$

$$Q_{SR} = \frac{T_{\text{海绵}}}{T_{\text{叶片}}} \quad (3)$$

式中: Q_{PS} 为栅海比; Q_{CTR} 为紧密度; Q_{SR} 为疏松度; $T_{\text{栅栏}}$ 为栅栏组织厚度; $T_{\text{海绵}}$ 为海绵组织厚度; $T_{\text{叶片}}$ 为叶片厚度。

1.2 植物抗旱指标

气孔特征:选取新鲜无缺损叶片,以主叶脉为中心,在近基部1/3位置撕取下表皮制成临时装片,在显微镜下测量气孔长度、气孔宽度、气孔密度,每个视野重复9次。

叶片相对水分亏缺。使用称重法,称取鲜叶质量(m_t),蒸馏水浸泡24 h后称饱和鲜重(m_s),105 ℃烘干至恒重(m_d),相对水分亏缺(%)= $(m_s - m_t) / (m_s - m_d) \times 100\%$ 。

叶片失水率:每种植物随机取健康的叶片6片,擦净称鲜重(m_t),室内自然干燥,24 h后称失水重(m_1),105 ℃杀青30 min,95 ℃烘至恒重(m_d),称干重计算失水率,失水率(%)= $(m_t - m_1) / (m_d \times 24) \times 100\%$ 。

比叶面积与比叶质量:用YMJ-A活体叶面积仪测定健康无损的叶片面积(S),80 ℃烘干至恒重(m_d),比叶面积(mm^2/g)= S/m_d ,比叶质量(g/mm^2)= m_d/S 。

脯氨酸含量:采用茚三酮比色法,提取叶片脯氨酸后,在520 nm波长下测定吸光度,对照标准曲线计算含量。

还原糖含量:采用蒽酮比色法,提取叶片还原糖后,在620 nm波长下测定吸光度,对照标准曲线计算含量。

1.3 数据分析工具

利用Statistica 8.0统计软件进行主成分分析和方差分析,植物间各指标的显著性差异采用Fisher LSD法进行检验($P < 0.05$),用Adobe Illustrator CS绘制柱状图。采用DPS7.05统计软件计算隶属函数值,综合评价植物抗旱性^[3],隶属函数法计算公式见式(4):

$$X_{ij}^{\Delta} = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (4)$$

式中: X_{ij} 为*i*植物*j*指标的抗旱系数; $X_{i\min}$ 为*j*指标中抗旱系数最小值; $X_{i\max}$ 为*j*指标中抗旱系数最大值; X_{ij}^{Δ} 为*i*植物*j*指标的隶属函数值。

将各植物的所测指标的隶属函数值相加求其平均值,该值为各植物的隶属函数值(\bar{X}_i), \bar{X}_i 值越大表示该植物抗旱性越强。

2 研究结果与分析

2.1 植物叶片解剖结构特征

角质层主要覆盖于叶片上表皮细胞的细胞壁外侧,主要成分为脂质性物质,具有不透水性与保护功能,厚度受外界环境条件的调控。一般而言,角质层厚度与植物体内水分保持能力呈正相关,角质层越厚,越能有效抑制体内水分的蒸腾散失,树种的抗旱性能也就越强^[15]。叶片解剖结构指标如表2所示。

表2 研究所用植物的叶片解剖结构指标(均值±标准差)

植物种类	角质层厚度/ μm	上表皮厚度/ μm	下表皮厚度/ μm	栅栏组织厚度/ μm	海绵组织厚度/ μm	叶片厚度/ μm	紧密度	疏松度	栅海比
葛	0.85±0.01c	17.05±0.58b	11.17±0.40c	73.90±3.39b	46.24±2.42bc	157.33±5.26b	0.47±0.01a	0.30±0.01c	1.73±0.13a
亮叶桦	0.97±0.01b	12.71±0.59d	8.72±0.3d	57.96±1.74cd	43.65±1.62c	123.96±3.31d	0.47±0.01a	0.35±0.01ab	1.35±0.04b
醉鱼草	1.01±0.03b	19.45±1.51b	11.07±0.28c	71.93±5.16b	44.32±1.41c	147.35±5.91bc	0.47±0.02a	0.31±0.01c	1.63±0.10a
野艾蒿	0.49±0.02e	17.35±0.52b	13.07±0.38b	49.45±1.32d	47.84±1.59bc	128.71±2.72cd	0.39±0.01c	0.37±0.01ab	1.06±0.04c
鬼针草	0.66±0.02d	16.95±0.47c	12.77±0.43b	55.12±1.43cd	46.70±1.60bc	132.47±3.20cd	0.42±0.01bc	0.35±0.01ab	1.20±0.04bc
戟叶酸模	1.65±0.03a	42.28±1.34a	30.92±0.88a	202.67±6.71a	166.09±6.33a	441.24±12.13a	0.46±0.01a	0.38±0.01a	1.25±0.04bc
两头毛	0.72±0.02d	17.01±0.52b	13.21±0.36b	65.30±3.19bc	52.80±2.23b	162.22±13.60b	0.42±0.02b	0.34±0.01b	1.28±0.06b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表2可知,戟叶酸模、两头毛、亮叶桦等7种植物叶片角质层厚度存在显著差异($P<0.05$),其中,戟叶酸模的角质层厚度达1.65 μm ,野艾蒿的角质层厚度最小,为0.49 μm 。植物角质层的厚度大小为戟叶酸模>醉鱼草>亮叶桦>葛>两头毛>鬼针草>野艾蒿。

叶肉组织中栅栏组织与海绵组织的比值(简称栅海比),是表征植物调控蒸腾失水过程的关键指标之一,栅栏组织的水分传导效率显著高于海绵组织,充足的栅栏组织可有效提升水分从维管束向表皮组织的传输效率,与此同时,栅栏组织还能扩大叶肉细胞的表面积,为光合作用过程中的水分供给提供稳定保障^[16]。戟叶酸模、两头毛、亮叶桦等7种植物的栅海比存在显著性差异($P<0.05$),葛的栅海比最大,达1.73,且所有植物栅海比均大于1,一定程度上说明煤矸石山的优势植物的栅栏组织比海绵组织要厚,保证了植物水分对光合作用的供给能力。

表皮细胞的存在与分布不仅具备结构保护效能,还兼具水分储存功能。叶片上、下表皮的组织厚度,在一定程度上可反映植物对水分散失的调控能力。通常,表皮组织厚度越大,植物的水分保持效能往往越强。从上下表皮厚度来看,戟叶酸模显著高于其他6种植物,上表皮厚度达42 μm ,下表皮厚度达31 μm 。

叶片紧密度反映了植物叶片栅栏组织的相对占比,紧密度越高,说明栅栏组织在叶片中占据的空间比例越大,叶片内部结构更致密,既利于栅栏组织捕获光照、提升光合速率,也能减少内部空隙导致的水分蒸腾,增强植物对干旱环境的适应能力。葛、亮叶桦、醉鱼草、戟叶酸模的紧密度最大,达0.46,显著高于其他3种植物。

叶片疏松度表征海绵组织的相对占比,疏松度越高,表明海绵组织在叶片中的占比越大,叶片内部通气间隙越丰富,疏松的海绵组织能为 CO_2 扩散提供充足通道,助力光合作用和呼吸作用中的气体交换,提升物质代谢效率。戟叶酸模、野艾蒿、亮叶桦、鬼针草的叶片疏松度最高,葛的叶片疏松度最低。

2.2 植物抗旱功能指标特征

植物叶片相对水分亏缺和失水率分别反映了叶片实际水分偏离饱和水分含量的程度和自然条件下的水分散失能力,用于判断植物叶片的水分状况和评估叶片的保水能力。植物抗旱功能指标如图1所示。

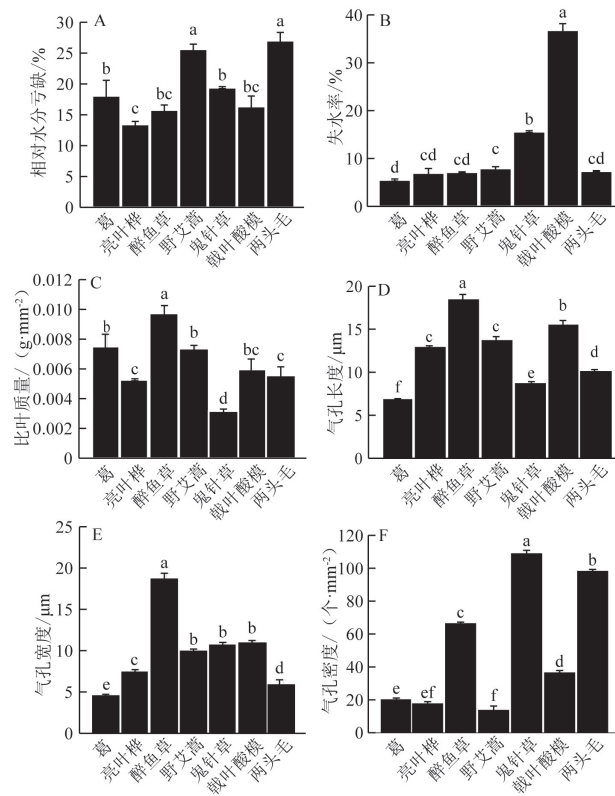


图1 研究所用植物的抗旱功能指标特征

由图1A看出,野艾蒿和两头毛叶片相对水分亏缺最大,亮叶桦叶片相对水分亏缺最小;由图1B看出,戟叶酸模叶片失水率最大,显著高于其他6种植物($P < 0.05$),说明其叶片失水越快。叶片比叶质量体现叶片的物质积累密度,是植物适应环境的重要指标,数值越高代表其抗旱能力越强;由图1C可知,7种植物的比叶质量大小为醉鱼草>葛>野艾蒿>戟叶酸模>两头毛>亮叶桦>鬼针草。煤矸石山植物叶片的气孔长度、气孔宽度显著小于非煤矸石山植物($P < 0.05$),气孔密度显著高于非煤矸石山植物($P < 0.05$)。植物主要通过气孔来进行蒸腾,气孔的大小和密度直接影响植物蒸腾的失水量。通常气孔小能使植物在干旱条件下减少水分损失,是植物抗旱的特征之一;由图1D和图1E可知,葛叶片的气孔最小,在控制水分丧失的能力上要强于其他植物;由图1F可知,气孔数量最多的是鬼针草,其次是两头毛,表明其通过提高气孔密度应对干旱胁迫。

叶片中的脯氨酸含量是植物抗干旱的重要指标,其含量越高,说明植物抗逆调节能力越强。而还原糖含量是植物碳代谢的核心产物,是植物重要的渗透调节物质,逆境下积累可提高细胞渗透压,增强保水能力,提升抗逆性。植物抗旱生理指标如图2所示。

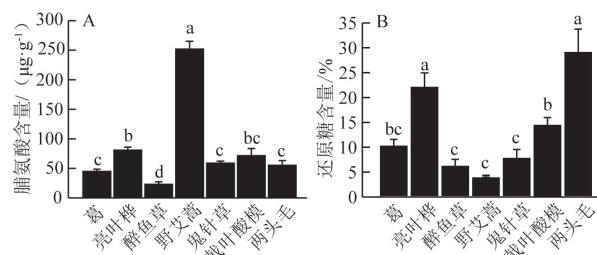


图2 研究植物的抗旱生理指标特征

从图2可知,野艾蒿叶片中的脯氨酸含量最高,显著高于其他6种植物($P<0.05$),但其还原糖含量却最低。而两头毛和亮叶桦叶片还原糖含量最高,显著高于其他5种植物($P<0.05$)。

2.3 主成分分析

将叶片解剖结构指标、抗旱性指标分为4个主成分,主成分得分系数矩阵如表3所示。

表3 主成分得分系数矩阵

指标		主成分			
		PC1	PC2	PC3	PC4
贡献率/%		41.31	19.13	14.78	6.60
荷载值	相对水分亏缺	0.31	-0.48	-0.24	0.04
	失水率	-0.94	-0.24	0.05	0.12
	比叶面积	0.02	-0.63	0.67	0.19
	比叶质量	0.07	0.66	-0.59	0.01
	还原糖含量	-0.08	-0.08	0.47	-0.78
	脯氨酸含量	0.17	-0.45	-0.75	-0.01
	气孔密度	0.12	-0.36	0.67	0.28
	上表皮厚度	-0.95	-0.03	-0.1	0.15
	下表皮厚度	-0.94	-0.17	-0.08	0.12
	栅栏组织厚度	-0.97	0.09	0.00	0.01
	海绵组织厚度	-0.98	-0.10	-0.09	-0.02
	叶片厚度	-0.98	0.00	-0.03	0.01
	紧密度	-0.21	0.70	0.31	-0.22
	疏松度	-0.27	-0.61	-0.27	-0.43
	栅海比	0.07	0.77	0.27	0.17
角质层厚度	-0.90	0.30	0.10	-0.10	

表3数据表明,PC1、PC2、PC3和PC4这4个主成分累计贡献率达81.82%。第一主成分(PC1)贡献率为41.31%,上表皮厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶片厚度、角质层厚度和失水率的荷载值较大,这些性状都与叶片厚度组成有关。随着叶片厚度的增加,植物的保水能力越强,抵御干旱胁迫的能力就越强;第二主成分(PC2)的贡献率为19.13%,紧密度和栅海比的荷载值较大(≥ 0.70),这两个指标是植物叶肉组成和结构的重要标志,在叶肉组织中,栅栏组织含有大量的叶绿体,其占比越高,植物的光合作用速率越快,而海绵组织越发达,植物气体交换和水分蒸腾速率就越快;第三主成分(PC3)和第四主成分(PC4)的贡献率分别为14.78%和6.60%,脯氨酸含量、还原糖含量的荷载值较大(≥ 0.70),这两个指标是植物抗旱与渗透调节的重要生理性指标,其含量越高,对植物的抗逆性就越强。

2.4 基于隶属函数法的抗旱性排序

隶属函数法在综合评价植物间的抗旱性能方面具有较高的可信度^[17],隶属函数综合评价排序结果如表4所示。

表4 研究植物的叶片解剖结构指标隶属函数值及综合评价排序

指标	葛	亮叶桦	醉鱼草	野艾蒿	鬼针草	戟叶酸模	两头毛
角质层厚度	0.58	0.47	0.48	0.38	0.57	0.60	0.48
上表皮厚度	0.56	0.53	0.15	0.42	0.38	0.57	0.56
下表皮厚度	0.41	0.50	0.39	0.45	0.25	0.50	0.55
栅栏组织厚度	0.44	0.58	0.38	0.49	0.52	0.54	0.30
海绵组织厚度	0.39	0.47	0.53	0.53	0.47	0.39	0.39
紧密度	0.43	0.50	0.50	0.59	0.48	0.71	0.65
疏松度	0.49	0.63	0.44	0.52	0.72	0.32	0.63
栅海比	0.33	0.30	0.44	0.44	0.21	0.57	0.50
隶属函数均值	0.45	0.50	0.41	0.48	0.45	0.53	0.51
抗旱性顺序	5	3	7	4	6	1	2

由表4可知,戟叶酸模、两头毛、亮叶桦等7种优势植物的抗旱性综合评价大小为:戟叶酸模>两头毛>亮叶桦>野艾蒿>葛>鬼针草>醉鱼草。根据隶属函数均值抗旱性综合评价划分标准^[18],隶属函数均值 ≥ 0.7 为强抗,定为I级; $0.7 >$ 隶属函数均值 ≥ 0.6 为抗,定为II级; $0.6 >$ 隶属函数均值 ≥ 0.4 为中抗,定为III级; $0.4 >$ 隶属函数均值 ≥ 0.3 为弱抗,定为IV级; $0.3 >$ 隶属函数均值 ≥ 0 为不抗,定为V级。由此可知,煤矸石山这7种优势植物的抗旱性均为III级中等水平。

3 讨论与结论

喀斯特煤矸石山兼具岩溶干旱、土壤贫瘠、保水性差等多重胁迫,植物在此生境的存活依赖于叶片解剖结构特化与生理代谢调节的协同适应,二者共同构成抗旱性的核心基础^[3]。本研究以贵州省六盘水喀斯特煤矸石山的戟叶酸模、两头毛、亮叶桦等7种优势植物为对象,系统分析叶片解剖结构、生理指标与抗旱性的关联,利用隶属函数法综合评价抗旱性是量化这种协同效应的有效手段,结果可为矿区生态修复植物筛选提供科学依据。

3.1 讨论

3.1.1 叶片解剖结构与抗旱性的关联机制

叶片解剖结构是植物适应干旱环境的重要形态基础,为水分保存与光合效率的平衡提供结构支撑。角质层、叶肉组织、表皮细胞等结构的特化直接影响水分保持与光合效率^[1,19]。角质层作为脂质屏障,其厚度直接影响蒸腾失水抑制能力。戟叶酸模1.65 μm 的厚角质层的角质层,结合42.28 μm 的上表皮和30.92 μm 的下表皮厚度,形成了强效的水分锁定结构,这是其抗旱性领先的关键形态基础,与Donselman等^[15]提出的角质层厚度与保水能力正相关的结论一致。叶肉组织的结构配比同样关键,戟叶酸模、两头毛、亮叶桦等7种植物栅海比均大于1,表明栅栏组织占比普遍高于海绵组织,既保障了水分从维管束向表皮的高效传导,又扩大了光合表面积。而葛、亮叶桦、醉鱼草、戟叶酸模等植物0.46~0.47的高紧密度,进一步通过致密的叶片结构减少水分蒸腾,这与李磊等^[20]关于抗旱植物叶片细胞密集度大的研究结论相符。同时,戟叶酸模、野艾蒿等较高的疏松度,又为 CO_2 扩散预留了通道,实现了干旱环境下水分保存与物质代谢的结构权衡。

3.1.2 抗旱功能指标的生态适应性意义

解剖结构是植物抗旱的“硬件基础”,抗旱功能指标是调控抗旱效能的“软件核心”,二者形成互补协同效应^[11,21-22]。渗透调节物质的积累策略呈现物种特异性。野艾蒿通过高脯氨酸含量实现短期干旱应急调节,而两头毛、亮叶桦则以高还原糖积累构建长期抗旱机制,后者的策略更利于提升综合抗旱排名。气孔特征与水分状况的调控同样体现功能适配性。葛的小分子气孔减少单位面积水分散失,鬼针草、两头毛的高气孔密度优化气体交换效率,而亮叶桦最小的相对水分亏缺,与其还原糖积累和发达根系形成协同,保障了干旱条件下的水分稳定。值得注意的是,戟叶酸模虽失水率显著高于其他植物,但这一现象源于其441.24 μm的厚叶片单位时间失水总量较高,其厚角质层与表皮的长效保水能力,结合其根系能穿入深层土壤,根深可达1~2 m的特点^[23],弥补了短期失水较快的不足,形成结构保水与深层取水的协同优势。比叶质量的差异则反映了植物抗逆基础的分化,醉鱼草虽具有最高比叶质量,但因次生代谢产物积累或气孔调节能力不足,未能转化为综合抗旱优势,导致其在研究所用的7种植物中排名末位。

3.1.3 隶属函数法综合评价的合理性与应用价值

隶属函数法通过整合解剖结构与抗旱功能指标的多维度信息,客观量化了二者的协同抗旱效应,在植物抗逆性评价中具有较高的可信度。综合评价结果显示,戟叶酸模、两头毛、亮叶桦等7种植物抗旱性均为Ⅲ级中抗,这一结果与煤矸石山极端恶劣的生境特征高度契合,表明只有具备结构—生理协同适应策略的植物才能在此存活,但生境限制了其抗旱等级的进一步提升。从综合评价排名来看,戟叶酸模凭借厚角质层、发达表皮、高紧密度的结构优势,与生理调节的协同作用,成为最优选择;两头毛、亮叶桦则分别通过高还原糖积累和稳定水分状况的功能优势,位列第2、第3位。这一排名清晰反映了结构特化和生理适配的协同程度直接决定植物抗旱性高低,也为生态修复植物筛选提供了明确依据,即结构—生理协同性强的物种,更适配喀斯特煤矸石山的多重胁迫生境。

3.2 结论

喀斯特煤矸石山的戟叶酸模、两头毛、亮叶桦等7种优势植物均表现为Ⅲ级中抗水平,这一结果与该生境干旱、土壤贫瘠、保水性差的典型特征相契合,表明只有具备一定抗旱适应策略的植物才能在此生境存活。叶片解剖结构特化与生理代谢调节的协同作用是植物适应干旱环境的核心机制,厚角质层与表皮可增强水分锁定能力,合理的栅海比与紧密度能平衡水分保存与光合作用,而还原糖、脯氨酸等渗透物质的积累则可提升细胞保水与抗逆调节能力。其中,戟叶酸模凭借解剖结构(厚角质层、发达表皮、高紧密度)与生理调节的协同优势,综合抗旱性最优,且其根系发达,是喀斯特煤矸石山生态修复的优选物种;两头毛与亮叶桦分别通过高还原糖积累和稳定的水分状况展现出较强抗旱潜力,可作为辅助修复植物。总之,研究明确了植物抗旱性与叶片结构、生理指标的关联规律,为类似退化生境的生态修复植物选择提供了理论参考与实践指导。

4 参考文献

- [1]吴丽君,李志辉,杨模华,等.赤皮青冈幼苗叶片解剖结构对干旱胁迫的响应[J].应用生态学报,2015,26(12):3619-3626.
- [2]Bray E A. Genes commonly regulated by water-deficit stress in *Arabidopsis thaliana* [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55, 407:2331-2341.
- [3]贺星.基于叶片解剖结构的4种小乔木植物适应性评价[J].热带农业工程,2024,48(6):39-45.
- [4]戴详艳,唐静,宋理洪.中国西南喀斯特地区土壤动物生态学研究进展[J].生态学杂志,2019,38(10): 3189-3194.
- [5]赵方莹,刘飞,巩潇.煤矸石山危害及其植被恢复研究综述[J].露天采矿技术,2013(2):77-81.
- [6]李超楠,王溢,陈三雄,等.粤西矿区9种先锋植物抗旱性综合评价[J].西部林业科学,2022,51(5):97-112.
- [7]南益聪,霍建强,韩高玲,等.干旱区植物水力传导与抗旱性研究进展[J].中国沙漠,2025,45(3):113-120.
- [8]郑永强,芦斌,娄明华,等.干旱胁迫对4种冬青属植物光合生理的影响[J].山东林业科技,2024,54(3):72-77.

- [9]程莉,李玉霖,宁志英,等.木本植物应对干旱胁迫的响应机制:基于水力学性状视角[J].生态学报,2024,44(7):2688–2705.
- [10]Wu J H,Guo Y,Zhao Q Z,et al.Effects of drought stress on anatomical structure and physiological indices of *Potentilla sericea* Leaves[J].Pratacultural Science2012,29(8):1229–1234.
- [11]曹小林,郝清玉,王勇,等.干旱胁迫下6种海防林植物幼苗光合生理特性及抗旱性评价[J].分子植物育种,2023,21(10):3424–3432.
- [12]周军英,王长永,续卫利.温度、水分和盐度对转基因耐草甘膦大豆种子萌发和幼苗生长的影响[J].生态与农村环境学报,2006,22(2):26–30.
- [13]张道远,尹林克,潘伯荣.怪柳属植物抗旱性能研究及其应用潜力评价[J].中国沙漠,2003,23(3):252–256.
- [14]王彩艳,潘占兵,左忠,等.5种金银花叶片解剖结构特征及其抗旱性研究[J].中国农学通报,2025,41(16):68–74.
- [15]Donselman H M,Flint H L.Genecology of Eastern Redbud (*Cercis canadensis*)[J].Ecology,1982,63(4):962–971.
- [16]肖军,袁林.四种阔叶树叶片解剖结构特征及其耐旱性比较研究[J].泰山学院学报,2010,32(6):117–120.
- [17]岑湘涛,沈伟,牛俊乐,等.基于植物叶片解剖结构的抗逆性评价研究进展[J].北方园艺,2021(18):140–147.
- [18]张卫星,赵致,柏光晓,等.不同基因型玉米自交系的抗旱研究与评价[J].玉米科学,2007,15(5):6–11.
- [19]Chen X,Xu Y F,Zhang Z Y. Leaf anatomical structure and photosynthetic physiology responses of *Sorbus folgneri* seedlings under drought stress[J].Acta Botanica Boreali–Occidentalia Sinica,2012,32(1):111–116.
- [20]李磊,贾志清,朱雅娟.我国干旱区植物抗旱机理研究进展[J].中国沙漠,2010,30(5):1053–1058.
- [21]Zhang T,Duan D,Zuo W,et al. Effects of water stress on the growth and photosynthesis characters of *Euonymus fortunei*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(3):71–74.
- [22]庄丽,陈亚宁,陈明,等.模糊隶属法在塔里木河荒漠植物抗旱性评价中的应用[J].干旱区地理,2005,28(3):325–329.
- [23]路艳宾.耐盐植物适应性及其根系固土特性研究[D].昆明:云南农业大学,2023.

Leaf Anatomical Structures and Drought Resistance of Several Dominant Plants in Karst Coal Gangue Hills

YANG Zaichao¹, ZHANG Zheng², AN Xuli², ZHANG Yunxi², XU Fang²

(1. School of Biological Science and Technology, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China;

2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: To screen strongly drought-resistant plants suitable for ecological restoration of karst coal gangue hills and provide theoretical and practical support for the ecological improvement of mining areas, this study investigated dominant plants from karst coal gangue hills in Liupanshui city, Guizhou province. Leaf anatomical structures were observed using the paraffin section method, drought-resistant functional indices of leaves were determined, and drought resistance was comprehensively evaluated by principal component analysis and membership function method. The results showed that the comprehensive drought resistance ranking of the dominant plants was as follows: *Rumex hastatus* > *Incarvillea arguta* > *Betula luminifera* > *Artemisia lavandulifolia* > *Pueraria lobata* > *Bidens pilosa* > *Buddleja lindleyana*. All the seven plants exhibited grade III (moderately resistant) drought resistance. *Rumex hastatus* exhibited the strongest drought resistance, attributed to synergistic advantages in anatomical traits—such as thick cuticle, well-developed epidermis, and high leaf tissue compactness—and physiological regulation. Principal component analysis indicated that leaf anatomical structures (e.g., cuticle thickness and epidermis thickness) and drought resistance physiological indexes (e.g., reducing sugar and proline contents) were key factors affecting plant drought resistance. Overall, *Rumex hastatus* is the preferred species for ecological restoration of karst coal gangue hills, while *Incarvillea arguta* and *Betula luminifera* can serve as supplementary species for restoration.

Keywords: Coal gangue; Leaf anatomical structure; Drought resistance index; Membership function method; *Rumex hastatus*

(责任编辑:杨洪校对:张俊英)