

引用格式: 马帅, 周海, 种培芳, 等. 平茬对四翅滨藜补偿生长及水分生理特征的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(3): 0353-0361. [MA S, ZHOU H, CHONG P F, et al. Compensatory growth and water physiological characteristics of *Atriplex canescens* under stubble treatment [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(3): 0353-0361.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20230618

平茬对四翅滨藜补偿生长及水分生理特征的影响

马 帅¹, 周 海², 种培芳^{1*}, 任 珩², 冯相艳²

(1 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

摘 要 【目的】四翅滨藜是荒漠化防治区广泛引种的优质旱生灌木, 平茬是其主要抚育管理措施, 揭示其平茬后恢复过程中的适应性和补偿生长机制, 可为四翅滨藜发展成荒漠区优质饲料提供理论支撑。【方法】以人工种植的 5 年生四翅滨藜植株为研究对象, 在平茬处理(留茬高度 10 cm)后, 测定四翅滨藜恢复过程中的株高、冠幅、光合反应、叶片水势、叶片导水率和水分利用效率, 并探讨功能性状间的关系。【结果】(1) 四翅滨藜平茬后的株高、冠幅和地上生物量经过 1 个生长季后能恢复至平茬前状态; (2) 平茬植株的叶水势、叶导水率、水分利用效率、光合参数均高于对照植株; (3) 线性拟合分析显示, 平茬植株的正午叶水势和气孔导度与生长速率呈显著正相关。【结论】四翅滨藜平茬后具有良好的补偿生长能力; 平茬植株在恢复生长前期表现出较高的补偿生长能力和典型的获取性策略, 后期随着水力状况降低又转向保守性策略; 平茬植株会将更多的生物量和资源分配到枝、叶等地上组织的生长, 后期的资源分配又转向促进地下部分生长。

关键词 四翅滨藜; 平茬; 补偿生长; 水分生理; 生态适应

中图分类号 Q945; S753.51 **文献标志码** A

Compensatory growth and water physiological characteristics of *Atriplex canescens* under stubble treatment

MA Shuai¹, ZHOU Hai², CHONG Peifang^{1*}, REN Heng², FENG Xiangyan²

(1 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Northwest Institute of Eco-Ecoenvironment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract [Objective] *Atriplex canescens* is a high-quality xerophytic shrub widely introduced in desertification control areas, and stubble is a main management measure for desertification control. Revealing the adaptability and compensatory growth mechanism in the recovery process after stubble can provide theoretical support for developing *A. canescens* into a high-quality feed in desert areas. [Methods] In this study, 5-year-old *A. canescens* plants were used as object. Through stubble treatment, plant height, crown width, photosynthetic reaction, leaf water potential, leaf hydraulic conductivity, and water use efficiency were measured during the recovery process of *A. canescens*, and the relationship between functional traits was discussed. [Results] (1) The plant height, crown width, and aboveground biomass of *A. canescens* after stubble were recovered to the pre-stubble state after a growing season. (2) The leaf water potential,

收稿日期: 2023-10-01; 修改稿收到日期: 2023-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171876); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0053); 甘肃省优秀博士项目(23JRRA627)

作者简介: 马 帅(1993—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事森林培育研究。E-mail: 583745278@qq.com

* 通信作者: 种培芳, 女, 教授, 博士生导师, 主要从事植物逆境生理生态研究。E-mail: zhongpf@gsau.edu.cn

leaf hydraulic conductivity, water use efficiency, and photosynthetic parameters of the stubble plants were higher than those of the control plants. (3) Linear fitting analysis showed that the midday leaf water potential and stomatal conductance of the stubble plants were significantly positively correlated with the growth rate. [Conclusion] *A. canescens* had good compensatory growth ability after stubble. In the early stage of recovery growth, the flat stubble plants showed higher compensatory growth ability and typical acquisition strategy, and then turned to conservative strategy with the decrease of hydraulic condition in the later stage. Stubble plants allocated more biomass and resource to the growth of aboveground parts such as branches and leaves, and the later resource allocation turned to the growth of underground parts.

Key words *Atriplex canescens*; stubbling; compensatory growth; water physiology; ecological adaption

四翅滨藜(*Atriplex canescens*)作为水土保持和植被演替的先锋树种,因其抗旱、速生、耐盐碱等特点,被广泛用于荒漠区的环境改善和盐碱地改良^[1]。不仅能加速荒漠区植被的恢复演替进程,其枝叶还为当地野生动物提供了重要的食物来源^[2-3]。四翅滨藜作为一种萌蘖植物,对地上部分破坏具有极强的补偿能力,这是其重要的生态适应策略,是作为生态物质持续利用和维持生态功能的主要基础,也是研究植物损伤后补偿和超补偿机制的好材料。如何根据四翅滨藜补偿生长特性对其生物资源进行充分合理利用是重要的理论和现实问题。

平茬作为林业生产中的主要抚育措施,是将植物一部分地上组织截断,通过消除顶端优势的方式来调整植株营养物质分配,从而实现补偿生长^[4]。植株在补偿生长过程中,通过调节自身的能量分配、改变形态或生理特征等途径以减轻损伤影响,实现快速生长^[5-7]。平茬后植株根冠比增大,根部吸收的大量水分被输送到较少的地上组织,打破了植株的水分传输和供给平衡^[8-9]。研究表明,在同种植物中,平茬植株的多项生理指标均优于对照植株,这与平茬植株较高的导水率有关^[9-10]。然而,随着平茬植株地上部分逐渐恢复,其水势和水分传输效率不断降低^[10-14],平茬植株在恢复过程中会通过调节形态(器官结构、生长速率、生物量等)和生理(光合作用、呼吸作用、导管结构等)来应对不断变化的水分状态^[5-7]。

萌蘖植物在平茬恢复初期具有较高的生长速率和水力传导率,随着平茬植株高度的增长和恢复程度的增加,自身的水力传导率逐渐丧失,降低了平茬植株的叶片水势,并诱发了叶片光合作用的降低,这可能是导致高度增长停止的原因^[10]。在野外试验中,通过水力性状与光合特性之间的关系来反映平茬恢复过程中适应水分下降和季节交替的研究较少。在现实中,生长在缺水环境中的植物通常表现出保守的策略,水力效率和气体交换率较低;相反,

生长在水源充足环境中的植物通常采取获取性策略,水力效率和气体交换率大幅提高^[15-17]。因此,植物在平茬后是否会表现出一种获取性策略,而随着平茬植株的逐渐恢复,是否会从获取性策略向保守性策略转变? 本试验以临泽县荒漠生境条件下人工种植的 5 龄四翅滨藜植株为研究对象,通过测量平茬恢复过程中株高、冠幅、光合反应、叶片水势、叶片导水率和水分利用效率等变化,以探究四翅滨藜平茬后植株在恢复过程中的适应性和补偿生长机制。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地位于甘肃省张掖市临泽县中国科学院临泽内陆河流域研究站(39°21'N, 100°07'E),海拔 1 384 m,地处绿洲-荒漠过渡带,属大陆干旱气候,年平均降水 117 mm,6—9 月降水约占年降水量的 65%,年蒸发量 2 390 mm,年均气温 8.9℃,最高气温 39.1℃,最低气温 -27.3℃,年均无霜期 165 d,年均风速 3.2 m/s,大于 8 级的大风天数年均 15 d,主风向为西北风,风沙活动主要集中在 3—5 月。地带性土壤为灰棕漠土,主要的荒漠植物种有梭梭(*Halaxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)等。

1.2 试验设计

选取荒漠生境条件下人工种植、株行距均为 1.5 m 的 5 龄四翅滨藜为研究对象。试验设置平茬组 and 对照组 2 个处理。每个处理小区面积为 720 m²,相邻的小区间以宽 50 cm、高 20 cm 廊道阻隔,选取株高约 80 cm、平茬前长势基本一致的 6 株作为重复并标记。2022 年 4 月 4—6 日对四翅滨藜平茬组植株进行平茬,留茬高度为 10 cm。

1.3 观测指标和方法

1.3.1 生长速率

在2022年植物生长季期间(4—9月)使用钢卷尺对四翅滨藜株高(植株根茎部到主茎顶部的距离)、冠幅(植株东西和南北宽度的平均值)进行测量并记录数据,每株测量3次,取平均值以减少误差。采用烘干法测量地上部分生物量,9月底用钢锯从标记植株地上10 cm处锯断,收集全部枝叶到牛皮纸袋内并做好记录,带回实验室用烘箱在85℃烘干48 h至恒重,取出称其干重记为地上生物量。

1.3.2 光合反应参数

试验期间,每月中旬选择天气晴朗日的上午(9:00—12:00),选取标记植株顶部5 cm以下、生长健康、长势基本一致的7枚向光叶片,使用LI-6400XT便携式光合仪(LI-COR, Lincoln, NE, USA)测定四翅滨藜叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r),每株测量2次作为重复。据此计算瞬时水分利用效率(instantaneous water use efficiency, $E_{WUE} = P_n/T_r$)和潜在水分利用效率(intrinsic water use efficiency, $E_{WUEi} = P_n/G_s$)。

1.3.3 叶片水势

生长季每月中旬选择连续晴天且无风日,在黎明前(4:00—6:00)从平茬组和对照组标记个体中各切除6枚健康的叶片用1515D压力室(美国PMS仪器公司)测定四翅滨藜叶片的黎明前叶水势(Ψ_{pd} , MPa)。采用同样方法在中午(12:00—14:00)测量四翅滨藜正午叶水势(Ψ_{mid} , MPa)。

1.3.4 叶片导水率

黎明前,从平茬组和对照组标记的个体中各截取1根健康枝条,将采集的枝条立即浸入到水中进行重新切割,浸水保存至距离200 m处实验室。测定前使用Parafilm封口膜缠绕枝条截面防止仪器带来的机械损伤和与仪器间的密闭性,使用植物导水率高压测量仪(HPFM-Gen3, Dynamax, Houston, USA)从截面处对枝条进行充水,待水流稳定时记录导水率数值(K_{25})。收集测定枝条上的全部叶片,湿毛巾擦干表面水分后使用EPSON扫描仪扫描其投影照片,用WinRHIZO软件计算其叶面积(S_1)。据此计算叶片导水率($K_1 = K_{25}/S_1$)。

1.4 数据分析

使用Excel 2016进行数据整理;利用SPSS 26.0中夏皮诺-威尔克(S-W)方法对数据进行正态性检验,显著性 $P > 0.05$ 时表明数据符合正态分布,再对数据进行“方差齐性检验”和“独立样本 t 检验”,若方差齐性检验 $P > 0.05$ 接受方差相等时 t 检验

结果,反之接受方差不相等时 t 检验结果;利用SigmaPlot 15.0和Origin 2021进行线性拟合分析($P < 0.05$)和作图。

2 结果与分析

2.1 平茬对四翅滨藜生长和生物量的影响

图1显示,四翅滨藜平茬植株经过165 d的恢复生长,其株高和冠幅便可分别达到对照植株的81.2%和96.2%,分别为84.58 cm和124.88 cm。5月20日—9月18日,平茬植株株高和冠幅生长量分别为68.33 cm和105.3 cm,而对照植株的生长量仅分别为18 cm和38.46 cm。从平茬植株和对照植株生长变化来看,平茬植株的生长速率呈持续降低趋势,而对照植株的生长速率较稳定。同时,经过1个生长季的补偿生长,平茬处理四翅滨藜植株地上生物量为721.47 g,恢复至同期对照植株(1 003.79 g)的71.87%(图1)。

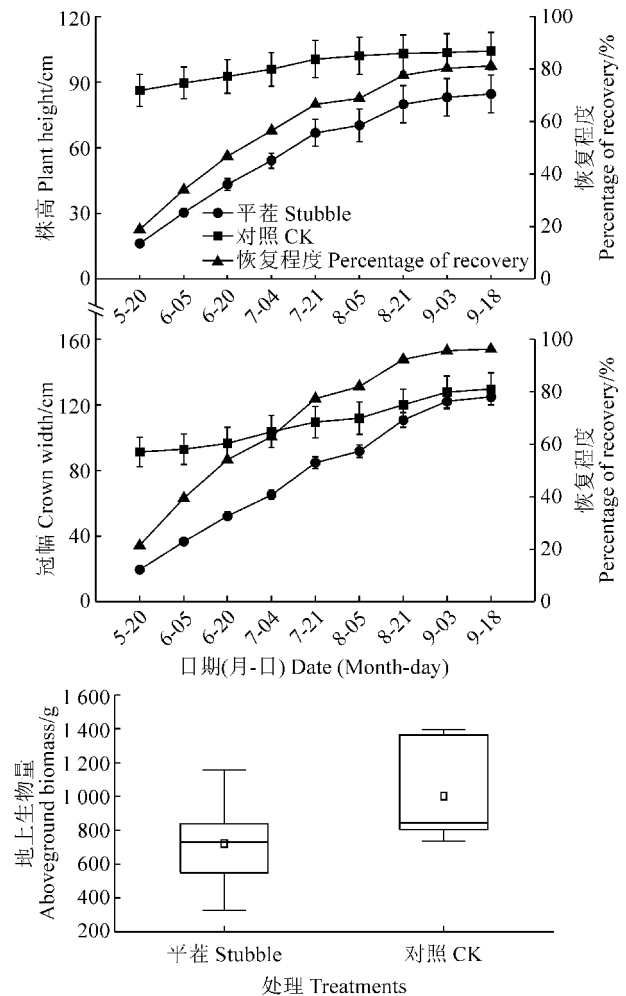


图1 平茬后四翅滨藜生长变化特征和地上生物量比较

Fig. 1 Growth characteristics and comparison of aboveground biomass in *A. canescens* after stubble

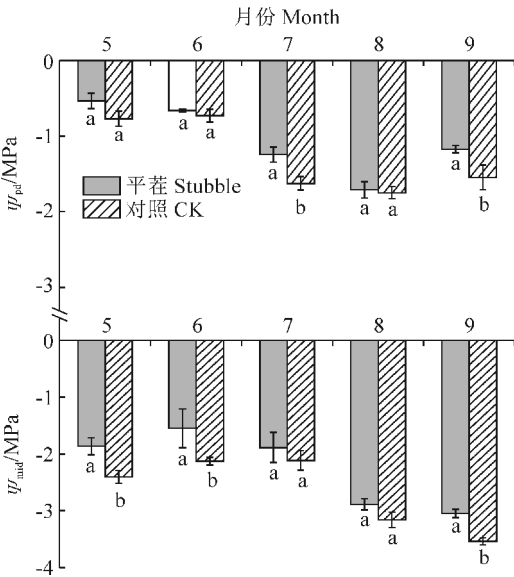
以上结果表明,平茬提升了四翅滨藜的生长速率,并且其生长速率会随着恢复程度增加呈持续降低变化,最终达到稳定状态,证明四翅滨藜在受到平茬干扰后具有很强的生长恢复能力。

2.2 平茬对四翅滨藜叶水势和水力传导效率的影响

2.2.1 叶水势

四翅滨藜平茬植株和对照植株在生长季的黎明前叶水势(Ψ_{pd})均呈先降低后升高变化趋势,而它们正午叶水势(Ψ_{mid})则呈现先升高后降低变化趋势(图2)。其中,平茬植株和对照植株的 Ψ_{pd} 均在8月达到最低,分别为 -1.71 MPa 和 -1.75 MPa ,而平茬植株在5月达到最高(-0.53 MPa),对照植株在6月达到最高(-0.72 MPa);平茬植株和对照植株 Ψ_{mid} 都在9月达到最低,分别为 -3.05 MPa 和 -3.54 MPa ,而平茬植株在6月达到最高(-1.55 MPa),对照植株在7月达到最高(-2.11 MPa)。对比平茬植株和对照植株各月份差值来看,平茬植株在恢复期内的 Ψ_{pd} 和 Ψ_{mid} 均高于对照植株。

以上结果表明,平茬能提升四翅滨藜的叶水势,从而提高了其物质积累和水分利用能力,而对照植株较低的叶片水势则能更好适应周围水环境的剧烈变化。



相同时期不同小写字母表示处理之间在 0.05 水平存在显著性差异。下同。

图2 平茬后四翅滨藜叶片水势变化

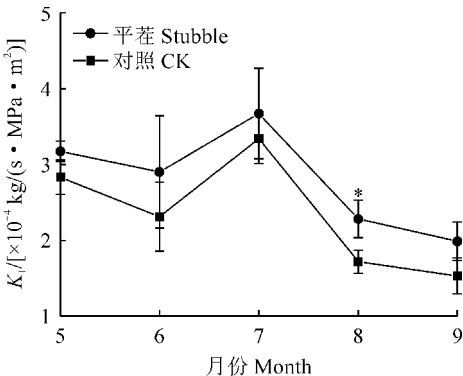
The different normal letters within same stage indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

The same as below.

Fig. 2 Changes of leaf water potential of *A. canescens* after stubble

2.2.2 叶片导水率

从图3可以看出,四翅滨藜平茬植株和对照植株在生长季的叶片导水率(K_l)变化趋于一致,两者峰值均出现在7月,分别为 $3.67 \times 10^{-4}\text{ kg/(s} \cdot \text{MPa} \cdot \text{m}^2)$;而后呈持续下降,均在9月达到最低值,分别为 $1.99 \times 10^{-4}\text{ kg/(s} \cdot \text{MPa} \cdot \text{m}^2)$ 和 $1.53 \times 10^{-4}\text{ kg/(s} \cdot \text{MPa} \cdot \text{m}^2)$ 。对比四翅滨藜平茬植株和对照植株在各月份的叶片导水率差值来看,平茬植株在恢复期的叶片导水率均高于对照植株。可见,平茬能提高四翅滨藜的叶片水分传输能力,使四翅滨藜能高效地进行养分运输。



* 代表在相同时期2个处理之间存在显著性差异($P<0.05$)。下同。

图3 平茬后四翅滨藜叶片导水率变化

* represents significant difference between the two treatments at the same time ($P<0.05$). The same as below.

Fig. 3 Changes of leaf hydraulic conductivity of *A. canescens* after stubble

2.3 平茬对四翅滨藜光合反应参数和水分利用效率的影响

2.3.1 光合参数

四翅滨藜平茬植株和对照植株在生长季的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)均表现出相似的变化趋势,且平茬植株始终高于同期的对照植株(图4)。其中,平茬植株和对照植株 P_n 在生长季均呈现先升后降变化,且始终存在显著性差异($P<0.05$);两者都在8月份达到最大值,分别达到 $18.98, 13.75\text{ }\mu\text{mol/(m}^2 \cdot \text{s})$,两者 P_n 的最小值分别出现在9月和5月,分别为 $12.02, 8.81\text{ }\mu\text{mol/(m}^2 \cdot \text{s})$,即平茬植株 P_n 的最小值出现时间更晚、数值更高。同时,平茬植株和对照植株 T_r 在生长季均呈现先升高后降低变化,但两者仅在7月存在显著差异($P<0.05$);平茬植株和对照植株的 T_r 峰值分别出现在6月[$6.78\text{ mol/(m}^2 \cdot \text{s})$]和7月[4.95

mol/(m²·s)],两者 T_r 最低值均出现在9月,分别为2.10,1.87 mol/(m²·s),两者比较而言,平茬植株 T_r 整体变化幅度更大。另外,平茬植株与对照植株 G_s 在7-8月有小幅上升外,在生长季整体呈持续降低趋势;平茬植株和对照植株 G_s 最大值均出现在5月,分别为0.26,0.16 mol/(m²·s),最低值均出现在9月,分别为0.08,0.06 mol/(m²·s),二者在生长季的 G_s 差值呈现逐渐减小趋势,但同期大多存在显著性差异($P<0.05$)。以上结果表明平茬提高了四翅滨藜植株的光合反应效率,提升了其物质积累能力。

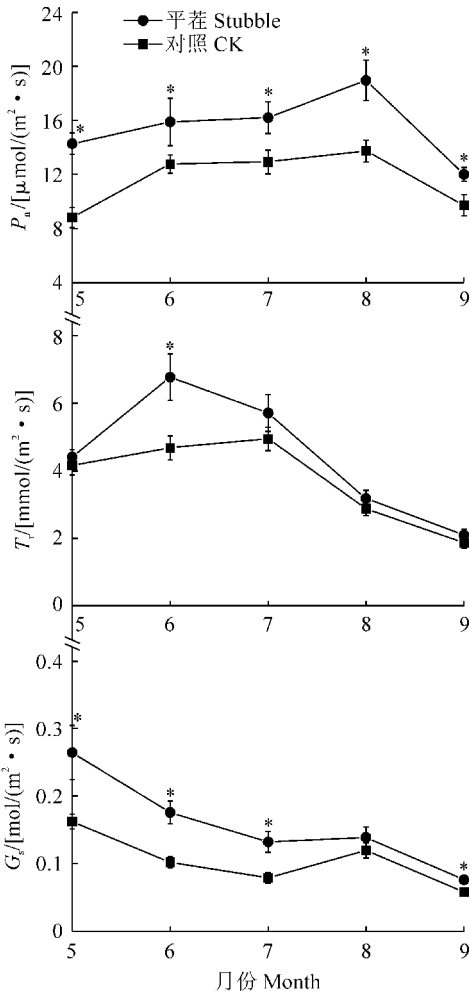


图4 平茬后四翅滨藜光合反应参数变化
Fig. 4 Changes of photosynthetic reaction parameters of *A. canescens* after stubble

2.3.2 水分利用效率

四翅滨藜平茬植株的瞬时水分利用效率(E_{WUE})整体高于对照植株,且二者在5月、8月和9月表现出显著差异($P<0.05$);从平茬植株和对照植株在生

长季的变化来看,二者在8-9月均有大幅升高,其中在5-7月和8-9月分别维持在2.5,5.0 μmol/mmol左右。同时,四翅滨藜平茬植株与对照植株的潜在水分利用效率(E_{WUEi})在6-8月表现出显著差异($P<0.05$),其中平茬植株6-7月显著低于对照植株,8月显著高于对照植株(图5);从生长季的变化来看,平茬植株的 $WUEi$ 在生长季呈持续上升变化,而对照植株呈浮动上升变化,其中平茬植株和对照植株 $WUEi$ 最大值分别出现在9月(160.40 μmol/mol)和7月(170.38 μmol/mol),二者的最低值都出现在5月,分别为81.74,61.33 μmol/mol。可见,平茬提升了四翅滨藜养分运输和物质积累效率,却降低了植株应对周围水环境变化的适应能力,而随着平茬植株恢复程度的逐渐增加,面对周围水环境变化的适应性会逐渐提升。

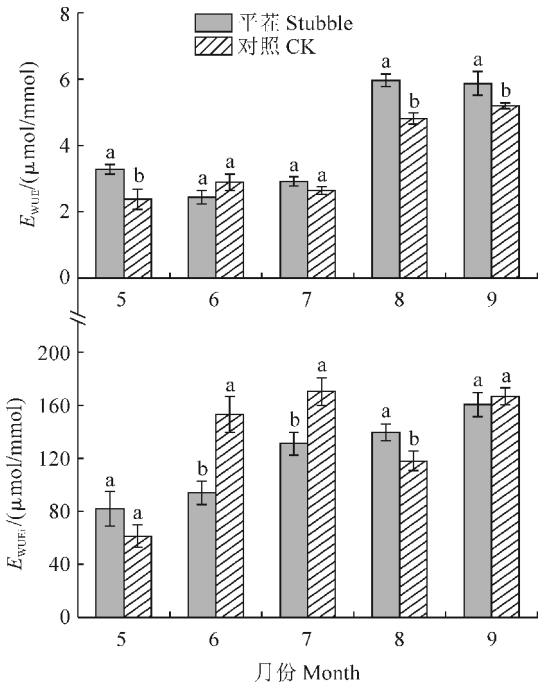


图5 平茬后四翅滨藜水分利用效率变化
Fig. 5 Changes of water use efficiency of *A. canescens* after stubble

2.4 四翅滨藜功能性状间的关系

2.4.1 正午叶水势与蒸腾速率的关系

通过四翅滨藜平茬植株和对照植株的叶片正午水势与蒸腾速率拟合分析,两者的正午水势与蒸腾速率间存在良好的极显著线性关系($P<0.01$),且平茬植株正午水势与蒸腾速率线性关系优于对照植株,即平茬植株水力状况更优于对照植株(图6)。

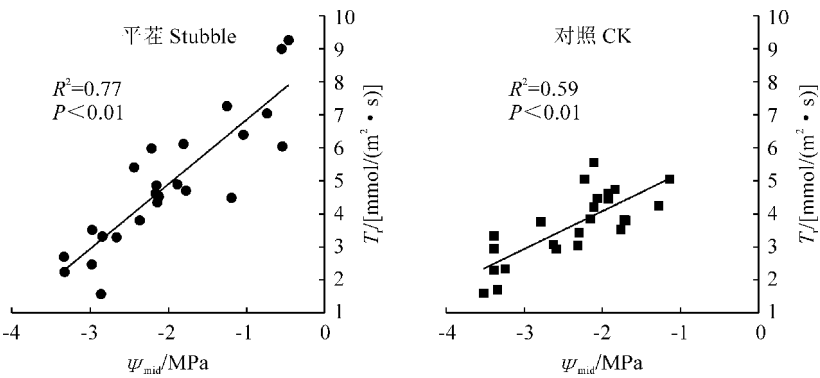


图 6 正午叶水势与蒸腾速率的关系

Fig. 6 Relationship between midday leaf water potential and transpiration rate

2.4.2 气孔导度和正午叶水势与株高生长速率的关系

四翅滨藜平茬植株和对照植株的株高生长速率与气孔导度(G_s)和正午叶水势(Ψ_{mid})均未表现出良好的线性拟合关系,但决定系数都较小(图 7)。其中,平茬植株的气孔导度与株高生长速率、正午叶水

势与株高生长速率表现出显著相关性($P<0.05$),而对照植株气孔导度与株高生长速率无显著相关性,正午叶水势与株高生长速率表现出显著相关($P<0.05$)。可见,四翅滨藜平茬植株的株高生长速率与正午叶水势和气孔导度相关,对照植株株高生长速率主要与正午叶水势相关。

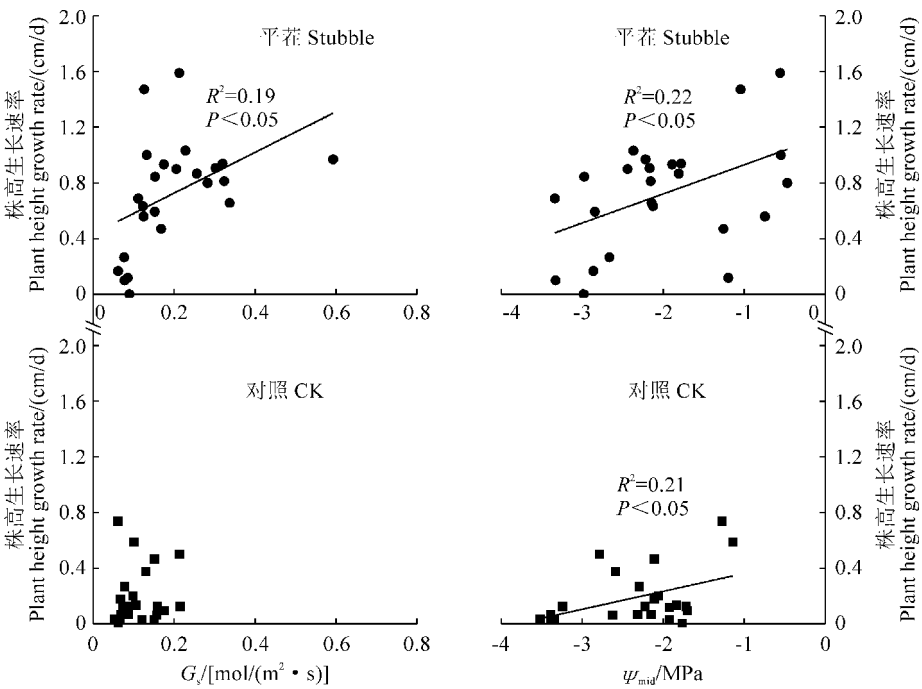


图 7 平茬和对照植株生长速率与气孔导度和正午水势的关系

Fig. 7 Relationship between growth rate and stomatal conductance or midday water potential of stubble plants and control plants

3 讨论

3.1 平茬条件下四翅滨藜生长及生物量的变化特征

植物的株高、冠幅和生物量是衡量植物物质积累的重要指标,可直观反映出植株的生长状况。本试验中,四翅滨藜植株在平茬后迅速生长与之前文

献报道的扰动后补偿生长植株迅速生长的情况^[18]一致,说明四翅滨藜在受到干扰后具有很强的补偿生长能力,同时平茬的机械损伤改变了四翅滨藜原有的生物量分配与异速生长的关系,导致植物对环境资源利用的再分配^[19-20]。植物的快速生长也被认为与植物的生理过程密切相关^[21],平茬植株在生

长季的恢复过程中,株高和冠幅的恢复率分别为81.2%和96.2%,而地上生物量的恢复程度仅仅为71.87%,表明平茬在改变了四翅滨藜株高和冠幅生长速率的同时,提高了平茬植株地上部分的含水量。可见,四翅滨藜受到外界干扰后会根据自身生长和环境变化,在资源利用、生物量分配和异速生长上会做出持续调整,这是植物在应对自身和环境变化中的一种适应性策略^[22]。

3.2 平茬条件下四翅滨藜叶水势及水分传输的变化特征

叶水势作为衡量植物水分供求状态的重要指标,能反映出植物对水分变化的调节对策^[23-24]。本试验中四翅滨藜平茬植株叶水势均高于同一测定日的对照植株,原因是平茬植株受到破坏后,地上叶片大幅减少,依靠原有根系能为地上部分更高效地供水,使地上组织的含水率增加,提高了平茬植株的叶水势,这与王震等^[25]研究结果类似。木质部导管和管胞是植物将根系吸收的水分和营养物质运输到叶片的主要通道,水分传导效率能反映出植物的水分和营养供应情况^[26]。本试验中平茬植株具有高于对照植株的含水量,相比于对照植株的耗水量也相对较高,使平茬植株具有更优于对照植株的水分传输效率,这是其具备更高的物质积累和生长速率条件之一。

3.3 平茬条件下四翅滨藜的光合特性

光合参数变化是衡量植物对周围环境适应性的重要指标^[7],较高的光合反应速率是植物生物量快速积累的关键因素^[27-28]。本试验通过平茬处理导致四翅滨藜根冠比失调,清除了地上低效组织对水分和养分的浪费,从而加速了养分运输和物质积累,同时为剩余器官和新生枝叶提供了良好的通风和透光条件^[29],促进了四翅滨藜的快速恢复。植物为防止高温、缺水环境对自身造成损伤,通常会通过减小气孔闭合度来降低水分蒸发,使根部吸收的水分更长时间保留在体内来维持其生命活动^[30]。本试验依靠临泽地区高温、缺水的自然条件,与平茬植株相比,对照植株较低的根冠比更难满足茂盛的地上组织的水分需求,使其通过关闭气孔来降低水分传输,根部吸收的水分可以更长时间保留在体内,来防止高温、缺水条件对自身造成损伤。由于8月自然降水的增加,植株会通过增大气孔闭合度来提高其水分运输能力,因此 G_0 有小幅的回升,而对照植株在水分供给出现变化时能做出更迅速的响应,导致此时对照植株 G_0 变化更大,从而验证了对照植株在

面对周围环境变化时的适应性优于平茬植株。

水分利用效率是反映植物对水分利用能力的重要指标,同时也是植物对干旱适应性的反映,即在同一生境条件下,水分利用效率越高、抗旱能力越强^[31]。吴亚婷等^[32]认为,植物对根生物量分配越多,瞬时水分利用效率越低,反之,瞬时水分利用效率越高。本研究中,四翅滨藜平茬植株叶片的瞬时水分效率高于对照植株,与王震等^[25]平茬能提高四木合的瞬时水分效率结果相一致。说明四翅滨藜平茬后地上组织受到损伤,平茬植株为了修复受损组织和竞争到更多的资源,会将更多的生物量分配到地上组织的生长,从而降低了根的生物量分配;而对照植株地上组织较为茂盛,当根系范围内的资源已无法满足其自身生命活动,需要从更大范围的土壤中来获取资源,因此对照植株会将更多的生物量分配到根的发育中。这表明四翅滨藜为了抵抗外界干扰时,在生物量分配上会做出适应性调整。

3.4 四翅滨藜功能性状间的相关性

本研究发现,四翅滨藜水力效率与叶片气孔导度之间存在相互协调的关系,在水分运输和利用方面,这是促进平茬植株快速恢复的一个优势。四翅滨藜平茬植株在恢复初期,由于根冠比的大幅增加,使其相比于对照植株具有更高的水势和水力传导速率,加速了其水分和营养的传输效率。水作为光合反应的基本原料,优越的水力传输效率为光合反应创造了优越条件,加速了物质积累,有助于植株快速地重新生长^[33],与前人的研究结果一致,即幼年平茬植株必须快速生长,具有较高的气孔导度和水力效率,以确保种群的快速重建,并在恢复过程中竞争到更多的营养、光线和空间^[5,8-10]。另一方面,相比于平茬植株,对照植株根冠比相对较低,依靠其现有根系无法满足茂密的地上组织的水分供应和营养运输,使其具有低而稳定的水力效率,导致光合反应相比平茬植株低,降低了物质积累和生长速率,因此呈现出保守性策略。对于对照植株来说,采取保守策略是有利的,尽管它降低了物质积累和生长速率,但由于其较低的水分传导速率,成功降低了生长过程中对周围环境的水分消耗^[10,16-17]。

4 结 论

(1)四翅滨藜平茬植株在恢复期间会表现出较高的补偿生长能力和典型的获取性策略,即较高的水势、水力效率和光合特性,而对照植株表现出相对的保守性策略;四翅滨藜平茬植株在补偿生长过程

中,为了适应自身不断降低的水力状况会表现出从获取性策略到保守性策略转变。

(2)四翅滨藜在受到外界干扰后,会改变其原有的生物量和资源分配策略,平茬植株会将更多的生物量和资源分配到枝、叶等地上组织的生长,而对照植株对地上组织的资源分配相对较少,可能将更多

的资源分配到根系的生长来满足在极端干旱区对水分的需求。

(3)四翅滨藜平茬植株在生长过程中的资源分配上会表现出从促进地上组织生长到促进地下部分生长的转变。

参考文献:

[1] 王帅,李得禄,楼金. 新奇主四翅滨藜接种肉苁蓉技术[J]. 甘肃林业科技,2021, 46(4): 36-39, 47.
WANG S, LI D L, LOU J. The technology of Inoculating *Cistanche deserticola* on *Atriplex canescens* [J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2021, 46(4): 36-39, 47.

[2] 刘铠源,卞义宁,陇东高原四翅滨藜水土保持效益研究[J]. 现代农业装备, 2022, 43(3): 62-65.
LIU K Y, BIAN Y N. Study on soil and water conservation benefits of *Atriplex canescens* in East Gansu Province [J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2022, 43(3): 62-65.

[3] MIGUEL M, GAUCA J E, MACAS-CRU U, *et al.* Growth and nutrients content of *Atriplex canescens* across a soil electric conductivity gradient[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2018, 16(2): e0302.

[4] 任晓亮,黄东晨,谷明远,等. 平茬高度对香椿生长及其光合特性和非结构性碳水化合物含量的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(4): 648-55.
REN X L, HUANG D C, GU M Y, *et al.* Growth and photosynthetic characteristics and non-structural carbohydrate content of *Toona sinensis* under different stubble height[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(4): 648-55.

[5] JACOBSEN A L, TOBIN M F, TOSCHI H S, *et al.* Structural determinants of increased susceptibility to dehydration-induced cavitation in post-fire resprouting chaparral shrubs [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2016, 39(11): 2473-2485.

[6] 赵福年,张强,周广胜,等. 春小麦对骤旱的响应特征及其阈值分析[J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5581-5591.
ZHAO F N, ZHANG Q, ZHOU G S, *et al.* The response characteristics and thresholds of spring wheat to flash drought [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(13): 5581-5591.

[7] 王世彤,宋帅帅,李杰华,等. 极小种群野生植物黄梅秤锤树的光合生理特性[J/OL]. 生态学杂志, 2023: 1-12[2023-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230711.1938.018.html>.
WANG S T, SONG S S, LI J H, *et al.* Photosynthetic characteristics of *Sinojackia huangmeiensis*, a plant species with extremely small population[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023: 1-12[2023-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230711.1938.018.html>.

[8] UTSUMI Y, BOBICH E G, EWERS F W. Photosynthetic,

hydraulic and biomechanical responses of *Juglans californica* shoots to wildfire[J]. *Oecologia*, 2010, 164(2): 331-338.

[9] SCHAFER J L, BRESLOW B P, HOLLINGSWORTH S N, *et al.* Size-dependent enhancement of water relations during post-fire resprouting [J]. *Tree Physiology*, 2014, 34(4): 404-414.

[10] FANG X W, TURNER N C, XU D H, *et al.* Limits to the height growth of *Caragana korshinskii* resprouts [J]. *Tree Physiology*, 2013, 33(3): 275-284.

[11] YAO G Q, NIE Z F, ZENG Y Y, *et al.* A clear trade-off between leaf hydraulic efficiency and safety in an aridland shrub during regrowth[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(10): 3347-3357.

[12] MENCUCCINI M, GRACE J. Developmental patterns of above-ground hydraulic conductance in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) age sequence[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1996, 19(8): 939-948.

[13] BAO J T, WANG J, LI X R, *et al.* Age-related changes in photosynthesis and water relations of revegetated *Caragana korshinskii* in the Tengger desert, Northern China [J]. *Trees*, 2015, 29(6): 1749-1760.

[14] BITTENCOURT P R L, PEREIRA L, OLIVEIRA R S. Pneumatic method to measure plant xylem embolism[J]. *Bio-protocol*, 2018, 8(20): e3059.

[15] VAN DER SANDE M T, POORTER L, SCHNITZER S A, *et al.* The hydraulic efficiency-safety trade-off differs between lianas and trees[J]. *Ecology*, 2019, 100(5): e02666.

[16] GONG X W, GUO J J, JIANG D M, *et al.* Contrasts in xylem hydraulics and water use underlie the sorting of different sand-fixing shrub species to early and late stages of dune stabilization [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 457: 117705.

[17] GUO J J, GONG X W, FANG L D, *et al.* Switching of dominant positions between two sand-fixing shrub species during the dune revegetation process is underlain by their contrasting xylem hydraulics and water-use strategies[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(10): 1195-1205.

[18] SWAIM J T, DEY D C, SAUNDERS M R, *et al.* Predicting the height growth of oak species (*Quercus*) reproduction over a 23-year period following clearcutting [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 364: 101-112.

[19] 谢然,陶冶,常顺利. 4 种一年生荒漠植物构件形态与生物量

间的异速生长关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 648-655.

XIE R, TAO Y, CHANG S L. Allometric relationship between modular morphology and biomass of four annuals in the Gurbantunggut Desert, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 648-655.

[20] 王丹,李熙颜,颜廷雨,等. 不同季节平茬对云南松生物量分配与异速生长的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(1): 47-52.

WANG D, LI X Y, YAN T Y, *et al.* Effects of flat stubble in different seasons on biomass allocation and allometric growth of *Pinus yunnanensis* [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(1): 47-52.

[21] KRAFT N J, GODOY O, LEVINE J M. Plant functional traits and the multidimensional nature of species coexistence [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(3): 797-802.

[22] 顾大形,陈双林,郭子武,等. 四季竹立竹地上现存生物量分配及其与构件因子关系[J]. 林业科学研究, 2011, 24(4): 495-499.

GU D X, CHEN S L, GUO Z W, *et al.* Above-ground biomass allocation and relationship with ramet component of *Oligostachyum lubricum* [J]. *Forest Research*, 2011, 24(4): 495-499.

[23] 林恬,郑选梅,郑怀舟. 成年马尾松针叶水势和形态对隔离降雨的响应[J]. 西部林业科学, 2021, 50(1): 50-55, 63.

LIN T, ZHENG X M, ZHENG H Z. Response of water potential and form of adult *Pinus massoniana* needles to rainfall exclusion [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2021, 50(1): 50-55, 63.

[24] 秦洁,司建华,贾冰,等. 巴丹吉林沙漠典型植物水势与导水率的时空变化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1629-1638.

QIN J, SI J H, JIA B, *et al.* Temporal and spatial variations of water potential and hydraulic conductivity of typical plant species in Badain Jaran Desert [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(6): 1629-1638.

[25] 王震,张利文,虞毅,等. 平茬高度对四合木生长及生理特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7078-7087.

WANG Z, ZHANG L W, YU Y, *et al.* Effect of different stubble height treatments on the annual growth index and physiological characteristics of *Tetraena mongolica* in two growing seasons [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22): 7078-7087.

[26] 王兆成,王磊,周梦钰,等. 3个薄壳山核桃品种叶片结构特征和枝条导水功能比较[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(3): 38-45.

WANG Z C, WANG L, ZHOU M Y, *et al.* Comparison on leaf structure characteristics and branch hvdraulic function of three *Carva illinoiensis* cultivars [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2021, 30(3): 38-45.

[27] 王东清,温学飞,李浩霞. 留茬高度对小叶锦鸡儿光合生理和生长特征的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 57-62, 70.

WANG D Q, WEN X F, LI H X. Effects of different stubble height treatments on characters of growth and photosynthetic physiology of *Caragana microphylla* bushwood [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6): 57-62, 70.

[28] 林铭业,廖良宁,姚贤宇,等. 接种促生菌对尾巨桉-降香黄檀混作幼苗光合生理特性和生长的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(7): 1126-1135.

LIN M Y, LIAO L N, YAO X Y, *et al.* Effects of growth-promoting bacteria inoculation on the photosynthetic physiological characteristics and growth of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*-*Dallergia odorifera* intercropping systems [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(7): 1126-1135.

[29] 方向文,王万鹏,何小琴,等. 扰动环境中不同刈割方式对柠条营养生长补偿的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(5): 810-816.

FANG X W, WANG W P, HE X Q, *et al.* A study on vegetative compensatory growth of shrub, *Caragana korshinskii*, under different clipping treatments in disturbance environment [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(5): 810-816.

[30] 朱珊珊,米俊珍,赵宝平,等. 干旱胁迫下喷施黄腐酸对燕麦光合及其抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(11): 1902-1909.

ZHU S S, MI J Z, ZHAO B P, *et al.* Effect of fulvic acid on photosynthesis and antioxidant enzyme activities of *Avena sativa* under drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(11): 1902-1909.

[31] SOBRADO M A. Relation of water transport to leaf gas exchange properties in three mangrove species [J]. *Trees*, 2000, 14(5): 258-262.

[32] 吴亚婷,龙健,李娟,等. 典型喀斯特石漠化区顶坛花椒养分、光合效率变化及与水分利用的关系[J]. 植物生理学报, 2023, 59(5): 1008-1016.

WU Y T, LONG J, LI J, *et al.* Changes in nutrient and photosynthetic efficiency of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* and relationship with water use in Karst Rocky Desertification Area [J]. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(5): 1008-1016.

[33] SANTIAGO L S, GOLDSTEIN G, MEINZER F C, *et al.* Leaf photosynthetic traits scale with hydraulic conductivity and wood density in Panamanian forest canopy trees [J]. *Oecologia*, 2004, 140(4): 543-550.