

# 采煤沉陷区模拟侵蚀破坏对小叶锦鸡儿光合生理特性的影响

张 欣<sup>1,2</sup>, 刘铁军<sup>1,2</sup>, 郭建英<sup>1,2\*</sup>, 杨振奇<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038;

2. 水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘 要:**为明确半干旱矿区植物生长及生理特性对侵蚀破坏的响应机制,以小叶锦鸡儿为对象,分析其枝叶生长、光合生理指标及水分利用效率在根系不同程度断裂损伤后的变化特征。结果表明,根系损伤对小叶锦鸡儿生长产生明显抑制作用,随损伤程度增大,抑制作用越明显,重度损伤后株高、冠幅、枝条长度和直径增长率相比对照分别降低了62.5%、61.1%、73.3%和74.4%;根系损伤对小叶锦鸡儿的各项光合指标均存在明显的抑制作用,同样具有根系损伤程度越大,叶片光合指标越低的变化趋势,以净光合速率为例,表现为对照( $22.40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 轻度损伤( $20.44 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 中度损伤( $17.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 重度损伤( $15.20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),而且根系损伤对光合指标的抑制作用在损伤形成后将长期存在,持续弱化叶片的光反应能力;根系损伤会改变小叶锦鸡儿叶片的水分利用效率,损伤程度越大,水分利用效率越高,表现为重度损伤( $4.30 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ) > 中度损伤( $3.97 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ) > 轻度损伤( $3.61 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ) > 对照( $3.52 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )。综合分析说明,在侵蚀破坏造成根系损伤后,小叶锦鸡儿会通过减缓生长和光合速率,降低水分需求,实现维持自身生存、生长和再生产的生存策略。

**关键词:**根系损伤;光合特性;侵蚀破坏;小叶锦鸡儿;采煤沉陷区

中图分类号:S793.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)05-0024-06

## Effects of Simulated Erosion Damage on Photosynthetic and Physiological Characteristics of *Caragana microphylla* in Coal Mining Subsidence Area

ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, LIU Tie-jun<sup>1,2</sup>, GUO Jian-ying<sup>1,2\*</sup>, YANG Zheng-qi<sup>1,2</sup>

(1. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 100038, Beijing, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources,

Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** In order to clarify the response mechanism of plant growth and physiological characteristics to erosion damage in semi-arid mining areas, *Caragana microphylla* was taken as the research object, and the changes of branches and leaf growth, photosynthetic and physiological indexes and water use efficiency were analyzed after different degrees of root damage. The results showed that root damage had a significant inhibitory effect on the growth of *C. microphylla*, and the inhibitory effect was more obvious with the increase of damage degree. Compared with the control, the growth rates of plant height, crown width, branch length and diameter after severe damage reduced by 62.5%, 61.1%, 73.3% and 74.4%, respectively. Root damage had a significant inhibitory effect on photosynthetic indexes of *C. microphylla*, and the greater the degree of root damage, the lower the photosynthetic indexes of the leaves. The net photosynthetic rates

收稿日期:2021-08-23 修回日期:2021-11-12

基金项目:国家自然科学基金(51779156);科技兴蒙;十大孔兑综合治理与水资源集约高效利用集成示范(KJXM-EEDS-2020005);内蒙古计划:黄河流域脆弱地质区防蚀控沙生态综合治理技术(2020GG0126)。

第一作者:张 欣,高级工程师。研究方向:水土保持。E-mail:nmmkszx@163.com

\* 通信作者:郭建英,博士生导师,正高级工程师。研究方向:草地水土保持与植被恢复。E-mail:guojy@iwhr.com

were in the order of control (22.40) > mild injury (20.44) > moderate damage (17.33) > severe damage (15.20  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Moreover, the inhibition of root damage on photosynthetic indexes would persist for a long time after the formation of root damage, and continue to weaken the light response capacity of the leaves. Root damage could change the water use efficiency (WUE) of the leaves, and the greater the damage degree, the higher the WUE, presenting the order of severe damage (4.30) > moderate injury (3.97) > mild injury (3.61) > control (3.52  $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ). In conclusion, after root damage caused by erosion, *C. microphylla* could realize survival strategy to maintain its own survival, growth and reproduction by slowing down the growth and photosynthetic rates and reducing water demand.

**Key words:** root injury; photosynthetic characteristics; erosion damage; *Caragana microphylla*; coal mining subsidence area

植物根系既是植物支撑锚固自身的基础组织,也担负着为地上枝叶吸收和传输水分和养分的重要功能,同时还是加固土体抵抗侵蚀的力学单元<sup>[1]</sup>。我国神东矿区的采煤沉陷区,因为煤炭开采导致区域内出现大量的地裂缝以及大面积的地块沉陷,这种重力侵蚀会破坏土体结构<sup>[2]</sup>。在侵蚀过程中,植物根系在增强土体抵抗位移和变形的同时,反作用力也会对根系产生拉拔和剪切破坏,当侵蚀营力超过根系的耐受极限,则会造成扭曲、变形和断裂等形式的根系损伤<sup>[3]</sup>。在半干旱矿区这样的脆弱生态区,植物的正常生长和群落演替是生态修复的前提。当根系在环境变化和侵蚀营力作用下产生损伤时,其功能和活性会弱化甚至丧失,进而产生的连锁反应则是植物地上部分各项生长生理指标的变化反馈,植物会出现生长衰退乃至死亡,直接影响矿区生态修复的效果和生态系统的稳定性。因此,开展植物生长对侵蚀破坏的响应及适应性研究,对于矿区生态修复和水土流失防治有重要作用。

光合作用是植物进行正常生命活动的基础,是对环境变化敏感的生理过程,光合特性可作为植物对侵蚀破坏响应的判定指标<sup>[4]</sup>。同时,植物对极限环境的适应,还反映于自身对碳同化和水分耗散关系的协调能力,即植物水分利用效率是其逆境生存的关键因子<sup>[5]</sup>。目前,国内外对植物光合生理及水分利用逆境响应的研究多集中于降水<sup>[6]</sup>、增温<sup>[7]</sup>、盐胁迫<sup>[8]</sup>和干旱胁迫<sup>[9]</sup>等环境要素变化的影响,而对侵蚀营力造成根系损伤胁迫的研究仍开展较少。尤其在半干旱矿区,由于自然环境和气候的本底条件较差,侵蚀营力对植物生长及光合生理特性的影响尤为剧烈,是生态系统稳定与否的直接决定因素。基于此,以神东矿区常见水土保持植物种小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)为试验对象,模拟地块沉陷与地裂缝对根系形成不同程度的断裂损伤,研究植物生长指标、光合生理指标及水分利用效率对根系损伤的响应特征,以期为矿区植被重建与生态修

复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市神木县与内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗交界处(110°05′—110°30′E, 39°15′—39°27′N),为神东矿区的采煤沉陷治理区。该区域南部为黄土丘陵区,北部为毛乌素风蚀沙化区。属于大陆性干旱半干旱气候,具有雨热同期的特征,降雨多集中于夏、秋两季,年平均降水量为396 mm,年平均蒸发量为1790 mm。春冬两季多风且干燥,年平均风速为3.5  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,年平均气温为8.9℃。土壤类型主要为风沙土,土壤结构较差且有机质含量较低,保水保肥效果差。主要植被类型为灌木、半灌木和多年生草本,常见种有小叶锦鸡儿、沙柳(*Salix cheilophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等。

### 1.2 试验设计

试验于2019年7—10月进行。在研究区中随机选择2~3年生小叶锦鸡儿,测定其株高、冠幅和基径,计算各指标均值作为标准株选择依据(表1),根据标准株大小选择相近小叶锦鸡儿80株作为供试株。

以供试株基径为圆心,半径为1 m,在地表画圆形。作2条相互垂直的交叉线将圆形四等分,分成4个扇形。选择1个扇形向下挖掘0.5 m,挖掘过程中出现的根系用修枝剪剪断,人为形成根系的25%断裂,视为轻度损伤,断根后原状土填埋、压实;选择2个扇形进行挖掘并剪断根系,形成约50%根系断裂,视为中度损伤;选择3个扇形进行挖掘并剪断根系,形成约75%根系断裂,视为重度损伤。同时,选择未受损的供试株作为对照。轻度、中度、重度损伤和对照植株均为20株,试验前测定灌木生长指标,包括供试株及对照株冠幅和株高,并选择健康枝条进行标记,测定枝条长度和枝条直径。分别在根系损伤前期(1~7 d)、中期(10~30 d)、后期(50~80

d)进行植株光合参数测定,共测定 12 次。在试验结束时再次测定各供试株及对照株冠幅、株高及标记枝条的长度和直径。生长指标增长率采用相对生长速率法表示,即单位时间内灌木株高、冠幅、枝条长度和直径的生长量占初始值的比值,计算方法如下

$$R_{GR}=\frac{1}{Q_o}\times\frac{dQ_c}{dt}\tag{1}$$

式中: $R_{GR}$  为相对生长速率/ $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $Q_o$  为初始值/ $\text{mm}$ ;  $Q_c$  为一段时间内灌木生长指标增量/ $\text{mm}$ ;  $t$  为时间/ $\text{d}$ 。

表 1 小叶锦鸡儿标准株生长状况  
Table 1 Growth state in standard strains of *C. microphylla*

指标类型		小叶锦鸡儿标准株				
地上生长指标	密度/(株·m <sup>-2</sup> )	盖度(%)	株高/m	冠幅/m <sup>2</sup>	基径/cm	分枝数
	0.14	0.13	0.72±0.15	0.95±0.22	1.53±0.34	15±3
根系生长指标	根系埋深/cm	根系含水率(%)	根表面积/cm <sup>2</sup>	根体积/cm <sup>3</sup>	根累计长/cm	根生物量/g
	50±10	43.14±5.25	238.06±42.53	5.61±1.33	838.76±102.35	5.37±1.12

1.3 光合参数测定

选择晴朗无云天气,使用 Li-6800 (Li-Cor, USA)便携式光合测定系统,于 10:00—11:00 对不同损伤程度下小叶锦鸡儿标记叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度进行测定,每株选取 3 片。小叶锦鸡儿瞬时水分利用效率计算公式如下:

$$W_{UE}=\frac{P_n}{T_r}\tag{2}$$

式中:  $W_{UE}$  为叶片水分利用效率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ );  $P_n$  为净光合速率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $T_r$  为蒸腾速率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

1.4 数据处理与分析

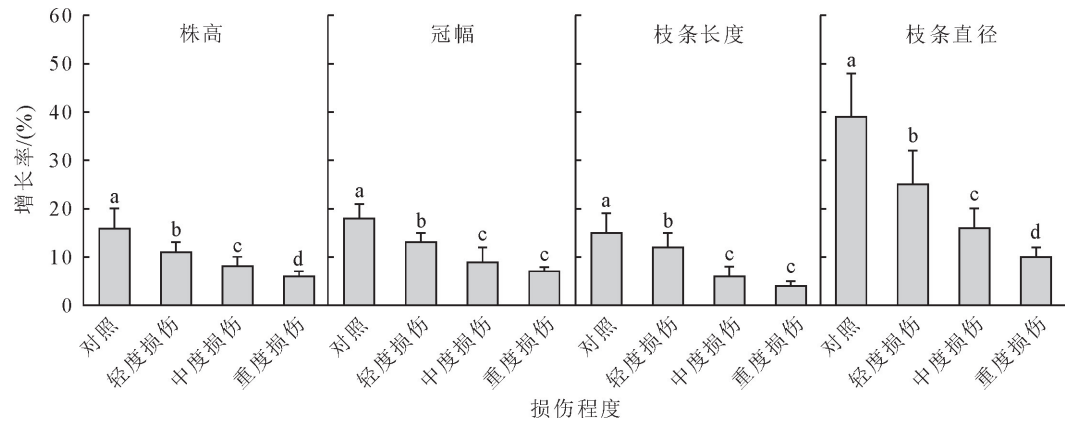
试验数据处理及做图采用 Excel 2010 及 Sigma Plot 14.0 软件完成,采用 SPSS 20.0 软件进行统计检验,选取最小显著极差法 (LSD) 对不同损伤程度

下小叶锦鸡儿叶片的光合特性指标进行差异性检验。

2 结果与分析

2.1 根系受损后植株生长特征变化

在根系损伤后期,小叶锦鸡儿地上部分生长状况见图 1。生长指标增长率均为正数,表明根系受损后植株仍能生长,但损伤后的增长率均显著低于对照( $P<0.05$ ),说明根系损伤均对植株生长产生了抑制作用,且随损伤程度增大,抑制作用越明显。在整株根系重度损伤下,与对照相比,小叶锦鸡儿株高增长率降低了 62.5%,冠幅增长率降低了 61.1%,枝条长度增长率降低了 73.3%,枝条直径增长率降低了 74.4%,而整株根系在轻度损伤下,各生长指标仅分别降低了 31.2%、27.8%、20.0% 和 35.9%。



注:图中不同字母表示生长指标在不同处理间差异显著。下同。

图 1 根系受损程度对小叶锦鸡儿生长指标的影响

Fig. 1 Effects of root damage degree on *C. microphylla* growth indexes

2.2 根系受损后叶片净光合速率变化特征

叶片净光合速率反映光合作用积累有机物的水平,根系损伤会显著影响该指标的变化(图 2)。在根系损伤前期、中期和后期,不同程度损伤的小叶锦鸡儿净光合速率均差异性显著( $P<0.05$ ),且具有

根系损伤程度越大,叶片净光合速率越低的变化趋势,且这种差异在损伤后期表现尤为明显:对照( $20.38\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )>轻度损伤( $17.98\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )>中度损伤( $16.65\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )>重度损伤( $11.01\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。根系损伤

对净光合速率的抑制作用在损伤形成后将一直存在,说明植物根系在侵蚀营力的破坏致损后,会长期对叶片净光合速率产生负效应,进而抑制光合产物的转化与积累。

### 2.3 根系受损后叶片蒸腾速率变化特征

植物叶片通过蒸腾作用来加强自身对水分的吸收与运输,根系损伤会显著影响该指标的变化(图3)。在根系损伤前期、中期和后期,不同程度损伤的小叶锦鸡儿蒸腾速率均差异性显著( $P < 0.05$ ),具有随损伤程度增大蒸腾速率降低的趋势。在损伤后期,各损伤程度间的差异有所减小,表现为对照( $0.007 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 轻度损伤( $0.006 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 中度损伤( $0.006 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 重度损伤( $0.005 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。说明侵蚀破坏对根系的损伤会在一段时期内持续抑制自身的水分传导功能。

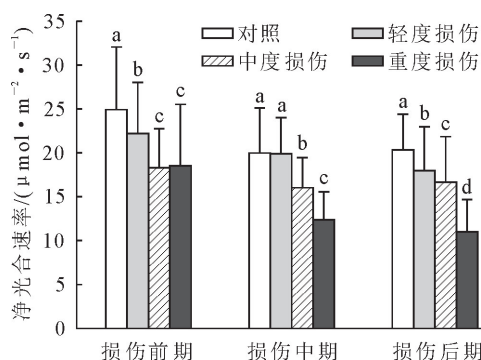


图2 根系受损程度对小叶锦鸡儿叶片净光合速率的影响

Fig. 2 Effects of root damage degree on net photosynthetic rate of *C. microphylla* leaves

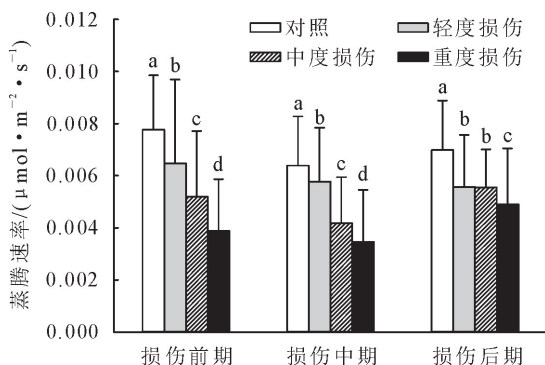


图3 根系受损程度对小叶锦鸡儿叶片蒸腾速率的影响

Fig. 3 Effects of root damage degree on transpiration rate of *C. microphylla* leaves

### 2.4 根系受损后叶片气孔导度变化特征

气孔导度反映气孔开放程度,能够控制植物体内气体交换和水分平衡,根系损伤同样会显著影响该指标的变化(图4)。在根系损伤前期、中期和后期,不同程度损伤的小叶锦鸡儿气孔导度差异均非

常显著( $P < 0.05$ ),并具有随损伤程度增大气孔导度下降的变化趋势。在损伤后期,气孔导度表现为对照( $0.32 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 轻度损伤( $0.30 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 中度损伤( $0.24 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 重度损伤( $0.21 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。表明小叶锦鸡儿在根系被侵蚀破坏后将持续降低对外界环境变化的响应。

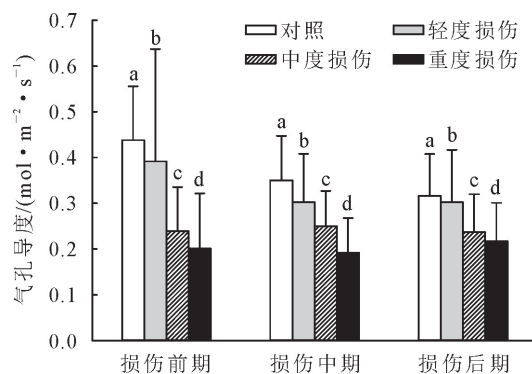


图4 根系受损程度对小叶锦鸡儿叶片气孔导度的影响

Fig. 4 Effects of root damage degree on stomatal conductance of *C. microphylla* leaves

### 2.5 根系受损后叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度变化特征

胞间CO<sub>2</sub>浓度作为光合作用的物质供给源,在根系受损后同样会受到影响(图5)。轻度损伤对胞间CO<sub>2</sub>浓度的影响较小,在损伤前期和中期与对照间无显著差异,但中度和重度显著降低了胞间CO<sub>2</sub>浓度。在损伤后期,该指标表现为对照( $282.39 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) > 轻度损伤( $264.58 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) > 中度损伤( $251.31 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) > 重度损伤( $250.91 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )。在试验期间,根系损伤对气孔导度的抑制作用一直存在,说明小叶锦鸡儿在根系被侵蚀破坏后,显著减少了对光合作用碳同化底物的供应。

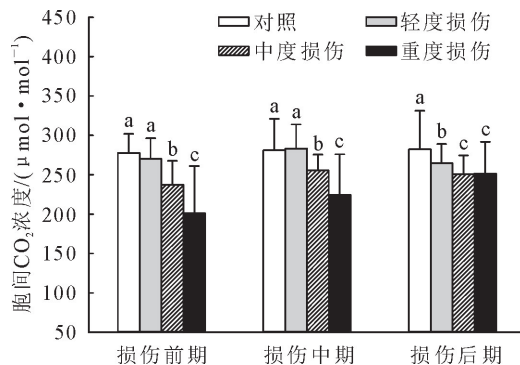


图5 根系受损程度对小叶锦鸡儿叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度的影响

Fig. 5 Effects of root damage degree on intercellular CO<sub>2</sub> concentration of *C. microphylla* leaves

### 2.6 根系受损后叶片水分利用效率变化特征

水分利用效率反映了植物对极限环境的适应



性,这种生存策略在根系遭受侵蚀破坏后会明显改变(图 6)。在损伤前期,根系损伤程度越大,水分利用效率越大,表现为重度损伤( $4.94 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )>中度损伤( $3.87 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )>轻度损伤( $3.51 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )>对照( $3.50 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )。但在损伤中期和后期,均以中度损伤后的水分利用效率最高,而重度损伤却逐渐降低。这说明适度的根系损伤胁迫会增强小叶锦鸡儿的水分适应性,但超过阈值的胁迫则会降低其生存能力。

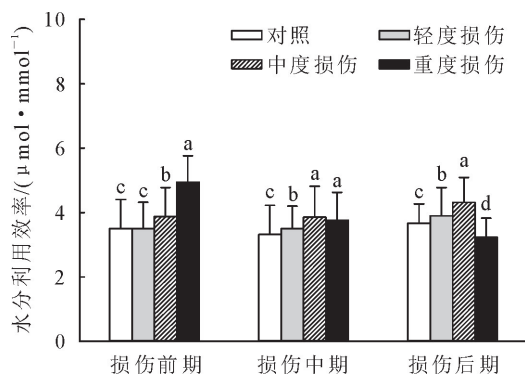


图 6 根系受损程度对小叶锦鸡儿叶片水分利用效率的影响  
Fig. 6 Effects of root damage degree on water use efficiency of *C. microphylla* leaves

2.7 光合指标关联性分析

由表 2 可见,小叶锦鸡儿叶片净光合速率与蒸腾速率和气孔导度呈极显著正相关( $P<0.01$ ),后者对净光合速率的影响最大。水分利用效率与蒸腾速率、气孔导度及胞间  $\text{CO}_2$  浓度呈极显著负相关,蒸腾速率对水分利用效率的影响最大。

3 结论与讨论

3.1 结论

采煤沉陷区中的地裂缝或地块沉降形成的拉拔破坏极易造成小叶锦鸡儿根系断裂,进而对其地上枝叶生长及光合生理特性产生抑制。随根系断裂程度的增加,小叶锦鸡儿的生长指标如株高、冠幅、枝条长度和直径的增长率在显著下降;光合指标如净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度也呈现出随根系受损程度加剧而显著降低的趋势。与之相反,小叶锦鸡儿叶片水分利用效率随根系损伤增大出现明显提升。在半干旱区侵蚀营力形成的胁迫环境中,小叶锦鸡儿通过减缓生长和光合速率,减少地上枝叶生物量积累和碳固定量,从而降低对水分的使用需求,以达到维持自身生存、生长和再生产的生存策略。

表 2 小叶锦鸡儿叶片光合指标相关性

Table 2 Correlation of photosynthetic indexes of *C. microphylla* leaves

指标类型	蒸腾速率	净光合速率	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度	气孔导度	水分利用效率
蒸腾速率	1	0.634 **	0.618 **	0.920 **	-0.751 **
净光合速率		1	0.170	0.754 **	-0.196
胞间 $\text{CO}_2$ 浓度			1	0.609 **	-0.621 **
气孔导度				1	-0.621 **
水分利用效率					1

注: \* 表示  $P<0.05$ , \*\* 表示  $P<0.01$ 。

3.2 讨论

3.2.1 根系损伤对小叶锦鸡儿枝叶生长的影响

本研究模拟采煤沉陷区地裂缝和地块沉降对小叶锦鸡儿整株根系形成的拉拔断裂破坏,轻度、中度和重度损伤均对小叶锦鸡儿地上枝叶的生长产生了抑制作用,造成了株高、冠幅、枝条长度和直径增长率的显著下降,且随损伤程度增大,抑制作用越明显。Y. Huang *et al*<sup>[10]</sup>的研究也表明煤炭开采对植被根系形成的胁迫可导致地表生物量损失,冯广龙等<sup>[11]</sup>也提出根系损伤后根系生物量会发生变化,并导致植物地上与地下部分比例失衡。由此可知,植物生长及生物量积累对侵蚀破坏产生的负反馈,在半干旱矿区重力侵蚀多发、频发的条件下,会引起植物出现大面积生长衰退甚至死亡,导致生态系统退化。

3.2.2 根系损伤对小叶锦鸡儿光合特性的影响

根系拉拔断裂破坏对小叶锦鸡儿叶片的净光合速

率、蒸腾速率、气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度均产生了显著且长期的抑制作用,也同样具有损伤程度越大,抑制作用越明显的特征。其主要原因仍在于根系的水肥吸收和传输的功能因为断裂破坏而相应丧失。根系对水分的吸收能够直接或间接影响叶片光合指标<sup>[12]</sup>。在本研究中,蒸腾速率与净光合速率呈极显著正相关,而蒸腾作用又能够显著促进植物体内水分的运输,根系断裂后从土壤中汲取的水分受限,蒸腾速率降低,水分运输限制会直接降低叶片净光合速率<sup>[13]</sup>。试验结果还表明,气孔导度是影响叶片净光合速率的主要因素,二者呈极显著正相关关系,当水分受限时,叶片中脱落酸含量增加,从而引起气孔关闭,气孔导度下降后会进入叶片的  $\text{CO}_2$  减少,降低了胞间  $\text{CO}_2$  浓度,气孔因素成为根系损伤胁迫净光合速率下降的重要原因<sup>[14]</sup>。同时,也有学者研究发现,植物体对土壤养分的吸收也是影响光合作

用的因素,根系断裂会限制小叶锦鸡儿从土壤中吸收和传输有效养分,导致净光合速率降低<sup>[15]</sup>。在本研究中,根系损伤对光合特性的抑制作用长期存在,这可能是因为根系损伤造成了植物水分限制,而水分胁迫会造成叶片叶绿体片层结构破坏,造成光合能力无法恢复<sup>[16]</sup>。根系从土壤中吸收水分的能力决定着植物茎干液流的潜力,而叶片蒸腾耗水90%来自于茎干液流<sup>[17]</sup>,因此,在根系损伤后木质部导管的水分运输受限,抑制了茎干液流进而导致了叶片的蒸腾速率出现显著下降。由此可知,半干旱矿区重力侵蚀破坏会引起植物叶片的光能利用受限,进而可导致生态系统的净初级生产力下降。

### 3.2.3 根系损伤对小叶锦鸡儿水分利用的影响

在采煤沉陷形成的侵蚀环境中,根系断裂后小叶锦鸡儿的水分利用效率会有一个显著提升,且断裂程度越大提升越明显,这表明小叶锦鸡儿在侵蚀破坏严重威胁到自身的生长发育时,会通过不断调整碳水关系<sup>[18]</sup>,增大自身水分利用效率,来维持基本生存和对逆境的适应。这与S. Chen *et al.*<sup>[19]</sup>的研究结果一致,黄囊苔草(*Carex korshinskyi*)也会通过改变水分利用效率来适应环境并使其表现出更强的竞争能力和生态适应性。影响植物叶片水分利用效率的因素分外部因子和内部因子,且二者之间也存在着连锁反应<sup>[20]</sup>。外部因子中土壤水分可利用性是关键条件<sup>[21]</sup>,在采煤沉陷区中,地裂缝或地块沉陷一方面使得深层土壤暴露,加速剖面土壤水分蒸发,从而降低土壤含水量<sup>[22]</sup>。另一方面,拉拔破坏造成的根系断裂会减少植物从土壤获取水分的通道,二者综合作用导致侵蚀区土壤水分可利用性显著下降,进行激发了植物内部的调节机制。为了维持体内水分的供需平衡,在水分来源减少时,叶片通过降低气孔导度减弱蒸腾作用以减少水分损失,在这个过程中减缓了叶肉细胞亚气孔间隙和周围大气间CO<sub>2</sub>的交换速率,胞间CO<sub>2</sub>浓度减小,植物能选择吸收的CO<sub>2</sub>相对减少,从而形成了较大的水分利用效率<sup>[23]</sup>。由此可知,半干旱矿区的侵蚀破坏会改变植物的水分利用策略,受损植物通过提高叶片水分利用效率以维持自身的基本生存和生长能力。

### 参考文献:

- [1] 柴成武,徐先英,唐卫东,等.石羊河流域荒漠区主要固沙植物根系研究[J].西北林学院学报,2009,24(4):21-26.  
CHAI C W, XU X Y, TANG W D, *et al.* Root system of the main sand fixing plants in desert zone of Shiyanghe River Basin [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4): 21-26. (in Chinese)
- [2] 胡振琪,王新静,贺安民.风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律[J].煤炭学报,2014,39(1):11-18.
- [3] 王双明,杜华栋,王生全.神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J].煤炭学报,2017,42(1):17-26.  
WANG S M, DU H D, WANG S Q. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17-26. (in Chinese)
- [4] 张颖,朱铭强,李浩,等.半干旱黄土丘陵区4种灌木树种的光合特性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(3):65-70.  
ZHANG Y, ZHU M Q, LI H, *et al.* Photosynthetic and physiological characters of four shrub species in the Loess Hilly-Gully region [J]. Journal of Northwest A&F University, 2012, 40(3): 65-70. (in Chinese)
- [5] YIN C, DUAN B, WANG X, *et al.* Morphological and physiological responses of two contrasting poplar species to drought stress and exogenous abscisic acid application [J]. Plant Science, 2004, 167(5): 1091-1097.
- [6] 郭连金,杜佳朋,吴艳萍,等.香果树实生苗的光合特性及其与环境因子的关系[J].应用生态学报,2017,8(5):1473-1481.  
GUO L J, DU J P, WU Y P, *et al.* Photosynthetic characteristics of *Emmenopterys henryi* seedlings and their relationships with environmental factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 8(5): 1473-1481. (in Chinese)
- [7] RUIZ-VERA U M, SIEBERS M, GRAY S B, *et al.* Global warming can negate the expected CO<sub>2</sub> stimulation in photosynthesis and productivity for soybean grown in the midwestern United States [J]. Plant Physiology, 2013, 162(1): 410-423.
- [8] HOU X L, HAN H, CAI L P, *et al.* Pb stress effects on leaf chlorophyll fluorescence, antioxidative enzyme activities, and organic acid contents of *Pogonatherum crinitum* seedlings [J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2018, 240: 82-88.
- [9] 杨司睿,范井伟,孙永强,等.罗布泊腹地人工植被梭梭的光学特性及其对干旱胁迫的响应[J].干旱区研究,2018,35(2):379-386.  
YANG S R, FAN J W, SUN Y Q, *et al.* Photosynthetic characteristics and response of *Haloxylon ammodendron* to drought stress in hinterland of the Lop Nur [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 379-386. (in Chinese)
- [10] HUANG Y, TIAN F, WANG Y, *et al.* Effect of coal mining on vegetation disturbance and associated carbon loss [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 73(5): 1-14.
- [11] 冯广龙,罗远培.土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究[J].生态学报,1999,19(1):98-105.
- [12] MEIR P, KRUIJT B, BROADMEADOW M, *et al.* Acclimation of photosynthetic capacity to irradiance in tree canopies in relation to leaf nitrogen concentration and leaf mass per unit area [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(3): 343-357.

(下转第79页)

- [23] 辛转霞,王文博,吉文丽,杨陵园林树种规划研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(6):177-180.  
XIN Z X, WANG W B, JI W L. Investigation and planning of the tree species for gardening in Yangling[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24 (6): 177-180. (in Chinese)
- [24] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4):309-320.
- [25] CAMPBELL G S, NORMAN J M. An introduction to environmental biophysics[M]. 2nd. New York: Springer-Verlag, 1998:5-9.
- [26] 韩磊,展秀丽,王芳,等. 河东沙区侧柏树干液流与蒸腾驱动因子的时滞效应研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1417-1423.
- [27] 赵春彦,司建华,冯起,等. 树干液流研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5):98-105.  
ZHAO C Y, SI J H, FENG Q, *et al.* Stem sap flow research: progress and prospect[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5):98-105. (in Chinese)
- [28] 李广德,付海曼,贾黎明. 银杏树干边材液流及水容特性研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4):54-58.  
LI G D, FU H M, JIA L M. Studies on the characteristics of xylem sap flow and water capacitance of *Ginkgo biloba* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29 (4): 54-58. (in Chinese)
- [29] 刘鑫,张金池,庄家尧,等. 杉木幼树树干液流影响因子及其对杉木林蒸腾量的贡献[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6):73-78.
- [30] 王华,赵平,蔡锡安,等. 马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺间的时滞效应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 225-230.
- [31] 王华田,马履一. 利用热扩式边材液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6):661-667.
- [32] 许蕊. 银杏的液流规律及与环境因子的关系[D]. 北京:北京林业大学, 2015.
- [33] 孙守家,古润泽,丛日晨,等. 银杏树干茎流变化及其对抑制蒸腾措施的响应[J]. 林业科学, 2006, 42(5):22-28.  
SUN S J, GU R Z, CONG R C, *et al.* Change of trunk sap flow of *Ginkgo biloba* and its response to inhibiting transpiration[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(5):22-28. (in Chinese)
- [34] 许浩,张希明,闫海龙,等. 塔克拉玛干沙漠腹地梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾耗水规律[J]. 生态学报, 2008, 28(8):3713-3720.

(上接第29页)

- [13] 罗彬莹,刘卫东,吴际友,等. 干旱胁迫对樟树幼苗光合特性和水分利用的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 49-55.  
LUO B Y, LIU W D, WU J Y, *et al.* Effect of drought stress on photosynthetic characteristics and water use of *Cinnamomum camphora* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39 (5): 49-55. (in Chinese)
- [14] 张淑勇,周泽福,张光灿,等. 半干旱黄土丘陵区4种天然次生灌木光合生理和水分利用特征[J]. 林业科学, 2008, 44(12): 140-146.  
ZHANG S Y, ZHOU Z F, ZHANG G C, *et al.* Characteristics of photosynthesis, respiration and water utility of four tree species of natural secondary shrubs in a semi-arid Loess Hilly-gully region[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(12): 140-146. (in Chinese)
- [15] 姜霞,苏春花,伍生磊,等. 盐肤木不同生育期光合特性及其与主要环境因子的关系[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19):155-160.
- [16] GIMENEZC, MITCHELL V G, LAWLOR D W. Regulation of photosynthetic rate of two sunflower hybrids under water stress[J]. Plant Physiol, 1992, 98(2):516-524.
- [17] 许浩,张希明,闫海龙,等. 塔克拉玛干沙漠腹地梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾耗水规律[J]. 生态学报, 2008, 28(8):3713-3720.  
XU H, ZHANG X M, YAN H L, *et al.* Water consumption and transpiration of *Haloxylon ammodendron* in hinterland of Taklimakan desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3713-3720. (in Chinese)
- [18] 李彦瑾,赵忠,孙德祥,等. 干旱胁迫下柠条锦鸡儿的水分生理特征[J]. 西北林学院学报, 2008, 3:1-4.  
LI Y J, ZHAO Z, SUN D X, *et al.* Hydrological physiological characteristics of *Caragana korshinskii* under water stress [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 3:1-4. (in Chinese)
- [19] CHEN S, BAI Y, LIN G, *et al.* Isotopic carbon composition and related characters of dominant species along an environmental gradient in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 71:12-28.
- [20] 董蕾,李吉跃. 植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理[J]. 生态学报, 2013, 33(18):5477-5483.  
DONG L, LI J Y. Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18):5477-5483. (in Chinese)
- [21] LIU W Z. Dynamic interrelations of crop production, water consumption and water use efficiency[J]. Journal of natural resources, 1998, 13(1):23-27.
- [22] 胡婵娟,刘国华,郭雷,等. 土壤侵蚀对土壤理化性质及土壤微生物的影响 [J]. 干旱区研究, 2014, 31(4):702-708.
- [23] CHAVES M M, PEREIRA J S, MAROCO J, *et al.* How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and Growth [J]. Annals of Botany, 2002, 89(7):907-916.