

## 3种委陵菜对践踏胁迫的生长与生理响应

曾思琦<sup>1</sup>,程澜<sup>1</sup>,张雪茹<sup>2</sup>,易文非<sup>1</sup>,范舒欣<sup>1</sup>,董丽<sup>1\*</sup>

(1. 北京林业大学,北京 100083;2. 北京蓟城智造科技有限公司,北京 100083)

**摘要:**【目的】为三种委陵菜的园林应用提供理论依据,为园林休憩绿地建设提供地被植物资源。【方法】以鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、绢毛匍匐委陵菜(*P. reptans* var. *sericophylla*)与匍匐委陵菜(*P. reptans*)为试验材料,进行不践踏(CK)、轻度践踏(L)与重度践踏(H)3种梯度践踏后,测定植物的生长、生理及土壤指标,并进行相关性分析。【结果】随着践踏的增强,土壤表现为容重与紧实度增加,总孔隙度与非毛管孔隙度降低;3种委陵菜生长表现为地上部分株高、冠幅与生物量减少,地下部生物量减少、根数增加;生理指标表现为叶片相对电导率(REC)升高、过氧化物酶(POD)含量增加,丙二醛(MDA)含量降低,叶片相对含水量(RWC)与叶绿素含量在绢毛匍匐委陵菜中降低,可溶性蛋白(SP)含量在匍匐委陵菜中先升高后降低,在另外两种委陵菜中持续下降。相关性分析结果表明委陵菜冠幅与土壤容重、紧实度、水分呈负相关,与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度呈正相关;地上、地下生物量与土壤紧实度、水分表现为负相关,与土壤总孔隙度呈正相关;根系构型特征与土壤紧实度、毛管孔隙度与水分存在相关性。【结论】轻度践踏下,委陵菜通过增加根数,提高SP与POD含量,减少水分流,清除活性氧以应对胁迫;重度践踏下,其生长与生理活动均受到抑制,且短时间内难以恢复。综合生长生理响应与恢复情况,鹅绒委陵菜的耐践踏性较另外两种委陵菜强。上述研究结果也为园林中依据游客量与践踏频率因地制宜选择地被植物种类提供参考。

**关键词:**绢毛匍匐委陵菜;匍匐委陵菜;鹅绒委陵菜;践踏胁迫;生长生理;土壤

**中图分类号:**S688.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)01-0071-09

**DOI:**10.13817/j.cnki.cycp.2025.01.009



随着气候变化与资源能源的短缺,节约型园林建设成为城市园林建设的重要发展方向,其中,应用抗逆性强的乡土地被植物是一项重要举措。乡土地被植物种类繁多、观赏性强且管理省工,应用于公园园路两侧、构筑物旁等游览区,能弥补因大面积铺设草坪引起的资源浪费等问题。但实际应用过程中部分地被植物受到践踏干扰,长势差,无法发挥应有的景观与生态价值。因此亟需挖掘观赏性强且耐践踏的

乡土地被植物。委陵菜(*Potentilla* spp.)是北京市的乡土地被植物,于2018年被列入北京市绿地林地建设推荐地被种类,其抗逆性强,景观效果好,园林应用潜力高<sup>[1-2]</sup>。但目前对于委陵菜耐践踏性知之甚少,探究委陵菜的耐践踏性,对于其园林应用具有重要意义。

践踏干扰直接和间接影响植物的生长与生理过程。一方面,践踏造成植物茎叶损伤,影响植物地上部的生长发育<sup>[3]</sup>;另一方面,践踏通过改变土壤理化性质间接影响植物的生长与生理活动。20世纪70年代,国外开始对帚石南(*Calluna vulgaris*)及长叶车前(*Plantago lanceolata*)等地被植物的耐践踏性进行研究<sup>[4]</sup>。国内研究起步较晚,戴其根等<sup>[5]</sup>于2004年首先提出了耐践踏性的概念,即植物在受到一定程度的践踏胁迫后,能自身恢复或通过科学养护管理后恢复到

收稿日期:2023-12-18;修回日期:2024-03-31

基金资助:北京市西城区财政科技专项(XCSTS-SD2021-09);国家自然科学基金项目(32171860)

作者简介:曾思琦(1999-),女,湖南株洲人,硕士研究生。

E-mail:18810898827@163.com

\*通信作者,研究方向为园林植物资源及其应用。E-mail:dongli@bjfu.edu.cn

原来生活状态的一种特性。随着乡土地被植物在园林绿地中的应用增加,国内学者陆续对紫花地丁(*Viola philippina*)<sup>[6]</sup>、东北百里香(*Thymus mandschuricus*)<sup>[7]</sup>、匍枝委陵菜(*P. flagellaris*)<sup>[8]</sup>及白三叶(*Trifolium repens*)<sup>[9]</sup>等地被进行了耐践踏试验,如马国良等<sup>[10]</sup>研究发现践踏胁迫影响了鹅绒委陵菜的表观质量、匍匐茎生长及生物量;常乐等<sup>[11]</sup>研究4种地被植物受践踏后的生长与叶绿素荧光特性发现藤本地被的耐践踏性较草本地被强;郭嘉<sup>[12]</sup>研究发现金叶过路黄(*Lysimachia nummularia* 'Aurea')在践踏胁迫下会启动抗氧化酶系统。然而目前对于地被植物耐践踏的研究较少,对于匍匐委陵菜及绢毛匍匐委陵菜的耐践踏性还未有相关研究,且已有研究主要探讨践踏对植物生长或生理层面的影响,对践踏胁迫下土壤变化的相关报道较少。因此,本研究以鹅绒委陵菜(*P. anserina*)、绢毛匍匐委陵菜(*P. reptans* var. *sericophylla*)及匍匐委陵菜(*P. reptans*)为试验材料,探究其对践踏胁迫的生长与生理响应特征及践踏胁迫下土壤物理性质变化对三种委陵菜生长与生理的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于北京林业大学三顷园苗圃(40.01°N, 116.34°E),属暖温带大陆性季风气候,试验期间环境温度为15~32℃,白天光照强度为25 000~35 000 lx,平均空气湿度为54.67%。

### 1.2 试验材料

试验材料为3种委陵菜属植物:鹅绒委陵菜、绢毛匍匐委陵菜与匍匐委陵菜。于2022年7月自北京林业大学三顷园苗圃母株上采取匍匐茎进行扦插,培养2个月后,挑选长势一致且良好的植株定植于长方形塑料盆(40 cm×70 cm×26 cm)内,株行距为10 cm×15 cm,每小区12株苗,周围设置10 cm的保护行,栽培基质由草炭、园土和蛭石组成,比例为2:2:1,基质pH值为7.25,有机质含量2.68%。实验开始前剪除全部匍匐茎。

### 1.3 试验设计

采用2因素裂区试验设计,以践踏强度为主因素、植物种类为副因素,设置不践踏(CK)、轻度践踏(L)与重度践踏(H)3种梯度,9个处理,重复3次,共27个

小区(图1)。每周两轮践踏,间隔4天,为模拟公园周中与周末人流量不等的情况,每周两轮的践踏次数分别为轻度践踏1次和5次,重度践踏5次和20次,试验进行2周(表1)。试验采用人工践踏,践踏者体重为50 kg,单只鞋底面积约为0.022 m<sup>2</sup>,单次践踏压强约为22 272 Pa。试验结束后15 d为恢复期,试验期与恢复期保持各小区其他环境条件一致。

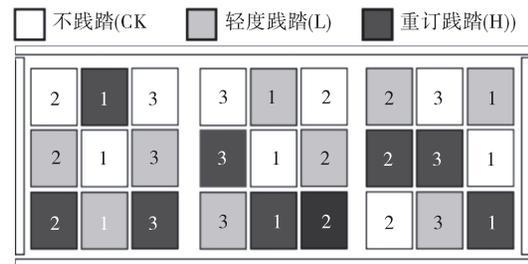


图1 裂区试验设计图

Fig. 1 Split-plot experimental design

注:1-鹅绒委陵菜;2-绢毛匍匐委陵菜;3-匍匐委陵菜。

表1 践踏频率设计

Table1 Trampling frequency design

践踏频率	践踏日期与践踏次数			
	9月4日	9月8日	9月11日	9月15日
不践踏(CK)	0次	0次	0次	0次
轻度践踏(L)	1次	5次	1次	5次
重度践踏(H)	5次	20次	5次	20次

### 1.4 测定指标及方法

1.4.1 土壤指标 于践踏结束后次日采用直径50.46 mm、高50 mm,容积为100 cm<sup>3</sup>环刀对表层土壤取样,取样完立即称湿重  $W_1$ ,后带回实验室。测定方法参照《水土保持监测指标的观测方法》<sup>[13]</sup>,将环刀去掉上盖后放入平底塑料盆,盆内加水至环刀上沿,放置36 h(期间及时加水以保持水位)后拿出并擦干环刀表面水分,称环刀和土壤重量  $W_2$ 。后将环刀虚盖至上盖放置在支架上静置24 h,称环刀和土壤重量  $W_3$ 。最后放入105℃烘箱中烘干,称环刀和土壤重量  $W_4$ ,计算公式如下:

$$\text{土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{(W_4 - W_0)}{V}$$

$$\text{土壤总孔隙度}(\%) = \frac{(W_2 - W_4)}{V} \times 100\%$$

$$\text{土壤毛管孔隙度}(\%) = \frac{(W_3 - W_4)}{V} \times 100\%$$

$$\text{土壤非毛管孔隙度}(\%) = \frac{(W_2 - W_3)}{V} \times 100\%$$

式中:  $W_0$ 为环刀重量(g),  $V$ 为环刀体积( $\text{cm}^3$ )。

土壤紧实度采用SL-TSA便携式土壤紧实度仪(北京盟创伟业科技有限公司,中国)现场测定;土壤水分采用SU-LBW便携式土壤温湿度仪(北京盟创伟业科技有限公司,中国)现场测定。以上各指标均重复测定3次。

1.4.2 生长指标 试验开始前每个处理随机选取3株标准株,于践踏结束次日采用卷尺现场测定其株高、冠幅,取均值精确到0.01 cm,随后采样带回实验室进行测定。根长采用卷尺测量,取均值精确到0.01 cm;根直径用电子游标卡尺测量,取均值精确到0.01 mm;母株叶片数与根数采用计数法。地上、地下生物量烘干后称重测定,取均值精确到0.01 g。

每个处理从非标准株上随机选取3片成熟叶片,用Yaxin-1241叶面积仪(北京雅欣仪器科技有限公司,中国)测定叶面积 $S$ ,放入60℃烘箱内烘至恒重,后用BAS224S分析天平(赛多利斯科学仪器有限公司,中国)测定叶片干重 $W$ ,比叶面积计算公式如下:

$$\text{比叶面积}(\text{cm}^2/\text{g}) = \frac{S}{W}$$

1.4.3 生理指标 于践踏结束后次日从非标准株上

采集成熟叶片,随后立即放入液氮中,带回实验室进行生理指标测定。叶片相对含水量(RWC)采用Weatherley方法测定<sup>[14]</sup>;叶绿素含量的测定采用95%乙醇浸提比色法<sup>[15]</sup>;相对电导率(REC)、丙二醛(MDA)、可溶性蛋白(SP)、超氧化物歧化酶(SOD)及过氧化物酶(POD)含量的测定均参照《植物生理生化实验原理和技术》进行<sup>[16]</sup>。以上各指标均重复测定3次。

1.4.4 恢复后指标 恢复指标的测定时间为践踏结束后15日,测定指标与方法同1.4.2。

## 1.5 数据处理

采用Microsoft Office Excel 2019与Origin 2022整理绘图,SPSS 26.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、多重比较(Duncan检验)、相关性分析(Pearson法)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同践踏胁迫下土壤物理性质的变化

随着践踏强度的增加,3种委陵菜均呈现出土壤容重与紧实度增加、总孔隙度与非毛管孔隙度降低的趋势。在重度践踏下,鹅绒委陵菜的土壤水分增加了119.48%(表2)。

表2 践踏胁迫对3种委陵菜土壤物理性质的影响

Table 2 Influence of trampling stress on the physical properties of three *Potentilla* spp.

植物种类	处理	土壤容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	土壤总孔隙 度/%	土壤毛管孔 隙度/%	土壤非毛管 孔隙度/%	土壤水分/%	土壤紧实度(Pa)
鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	CK	0.40±0.01 <sup>c</sup>	72.93±0.25 <sup>a</sup>	60.92±2.57 <sup>b</sup>	12.01±2.33 <sup>a</sup>	14.03±0.50 <sup>b</sup>	466.67±20.82 <sup>c</sup>
	L	0.50±0.01 <sup>b</sup>	70.61±0.59 <sup>b</sup>	67.95±0.95 <sup>a</sup>	2.66±0.37 <sup>b</sup>	23.80±6.70 <sup>ab</sup>	993.33±51.32 <sup>b</sup>
	H	0.61±0.01 <sup>a</sup>	63.46±0.01 <sup>c</sup>	61.36±0.2b	2.10±0.21 <sup>b</sup>	30.80±5.70 <sup>a</sup>	1410.00±137.48 <sup>a</sup>
绢毛匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i> var. <i>sericophylla</i>	CK	0.36±0.07 <sup>b</sup>	72.88±3.09 <sup>a</sup>	60.12±8.48 <sup>a</sup>	12.77±5.87 <sup>a</sup>	20.53±3.73 <sup>a</sup>	460.00±108.17 <sup>b</sup>
	L	0.51±0.03 <sup>a</sup>	69.61±2.46 <sup>ab</sup>	66.73±1.74 <sup>a</sup>	2.88±0.82 <sup>b</sup>	20.87±3.62 <sup>a</sup>	940.00±186.82 <sup>a</sup>
	H	0.53±0.03 <sup>a</sup>	67.82±1.17 <sup>b</sup>	64.82±1.90 <sup>a</sup>	3.00±0.74 <sup>b</sup>	21.57±5.46 <sup>a</sup>	1136.67±106.93 <sup>a</sup>
匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i>	CK	0.41±0.04 <sup>b</sup>	73.6±1.76 <sup>a</sup>	64.17±2.86 <sup>a</sup>	9.43±1.11 <sup>a</sup>	27.97±2.15 <sup>a</sup>	416.67±75.06 <sup>c</sup>
	L	0.51±0.05 <sup>ab</sup>	69.11±1.56 <sup>ab</sup>	63.77±1.38 <sup>a</sup>	5.34±2.21 <sup>b</sup>	24.9±10.73 <sup>a</sup>	736.67±83.27 <sup>b</sup>
	H	0.59±0.06 <sup>a</sup>	64.82±5.56 <sup>b</sup>	62.41±5.21 <sup>a</sup>	2.41±0.39 <sup>c</sup>	27.47±5.01 <sup>a</sup>	1190.00±124.90 <sup>a</sup>

注:不同小写字母表示同种植物不同践踏处理差异显著( $P<0.05$ ),下同。

### 2.2 践踏胁迫对3种委陵菜生长特性的影响

#### 2.2.1 践踏胁迫对3种委陵菜地下部生长的影响

随践踏胁迫的增强,鹅绒委陵菜地下生物量与根直径显著减小,重度践踏下分别减少73.68%和31.80%;

绢毛匍匐委陵菜地下生物量在轻度践踏下达到最大值,显著增加了31.90%。3种委陵菜的根数均在轻度践踏下达到最大值,较CK分别增加了38.89%、

130.00%与66.67%。而根长变化在3种委陵菜中均不显著(表3)。

表3 不同践踏胁迫下3种委陵菜地下部生长指标的变化

Table 3 Changes of subsurface growth indexes of three *Potentilla* spp. under different trampling stress

植物种类	处理	地下生物量/g	根长/cm	根数	根直径/mm
鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	CK	0.94±0.31 <sup>a</sup>	10.73±2.89 <sup>a</sup>	6.00±2.00 <sup>ab</sup>	3.05±0.35 <sup>a</sup>
	L	0.62±0.04 <sup>a</sup>	9.70±0.5 <sup>a</sup>	8.33±0.58 <sup>a</sup>	3.16±0.32 <sup>a</sup>
	H	0.25±0.11 <sup>b</sup>	9.20±0.61 <sup>a</sup>	4.00±1.00 <sup>b</sup>	2.08±0.53 <sup>b</sup>
绢毛匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i> var. <i>sericophylla</i>	CK	0.22±0.02 <sup>b</sup>	16.70±3.48 <sup>a</sup>	3.33±0.58 <sup>b</sup>	2.27±0.1 <sup>a</sup>
	L	0.30±0.03 <sup>a</sup>	13.93±3.48 <sup>a</sup>	7.67±1.15 <sup>a</sup>	2.23±0.22 <sup>a</sup>
	H	0.18±0.05 <sup>b</sup>	13.30±4.65 <sup>a</sup>	4.00±0.00 <sup>b</sup>	1.90±0.28 <sup>a</sup>
匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i>	CK	0.32±0.17 <sup>a</sup>	16.37±1.32 <sup>a</sup>	5.00±1.00 <sup>b</sup>	1.46±0.49 <sup>a</sup>
	L	0.37±0.09 <sup>a</sup>	16.53±4.35 <sup>a</sup>	8.33±0.58 <sup>a</sup>	1.49±0.3 <sup>a</sup>
	H	0.15±0.07 <sup>a</sup>	14.40±2.39 <sup>a</sup>	6.67±1.53 <sup>ab</sup>	0.84±0.09 <sup>a</sup>

2.2.2 践踏胁迫对3种委陵菜地上部生长的影响 随着践踏的增强,3种委陵菜的株高与冠幅均显著降低,重度践踏下,鹅绒、绢毛匍匐和匍匐委陵菜的株高分别下降了56.01%、59.64%和50.18%,冠幅分别下降了60.61%、32.68%与54.10%;生物量在鹅绒和匍

匐委陵菜中持续减少,在绢毛匍匐委陵菜中表现为先增加后减少,在轻度践踏下较CK相比增加了35.92%;比叶面积在鹅绒委陵菜中显著增加,重度践踏下增加了46.50%;母株叶片数在3种委陵菜中均显著减少(表4)。

表4 不同践踏胁迫下3种委陵菜地上部生长指标的变化

Table 4 Changes of aboveground growth indexes of three *Potentilla* spp. under different trampling stress

植物种类	处理	株高/cm	冠幅/cm	地上生物量/g	比叶面积/ (cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	母株叶片数
鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	CK	20.53±0.83 <sup>a</sup>	31.9±4.33 <sup>a</sup>	2.42±0.21 <sup>a</sup>	177.31±26.28 <sup>b</sup>	6.67±1.53 <sup>a</sup>
	L	14.37±1.19 <sup>b</sup>	25.3±6.40 <sup>a</sup>	1.89±0.6 <sup>a</sup>	183.87±25.76 <sup>b</sup>	8.00±1.00 <sup>a</sup>
	H	9.03±2.46 <sup>c</sup>	12.57±2.63 <sup>b</sup>	0.6±0.33 <sup>b</sup>	259.75±33.58 <sup>a</sup>	4.33±0.58 <sup>b</sup>
绢毛匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i> var. <i>sericophylla</i>	CK	9.17±2.41 <sup>a</sup>	16.93±3.38 <sup>a</sup>	1.42±0.66 <sup>ab</sup>	243.98±50.38 <sup>a</sup>	14.00±6.08 <sup>ab</sup>
	L	7.20±2.34 <sup>ab</sup>	16.47±1.76 <sup>a</sup>	1.93±0.74 <sup>a</sup>	248.61±47.71 <sup>a</sup>	22.00±7.81 <sup>a</sup>
	H	3.70±1.82 <sup>b</sup>	11.40±1.42 <sup>b</sup>	0.53±0.32 <sup>b</sup>	234.41±69.16 <sup>a</sup>	8.67±1.53 <sup>b</sup>
匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i>	CK	9.37±4.84 <sup>a</sup>	17.50±3.52 <sup>a</sup>	1.16±0.75 <sup>a</sup>	288.68±26.4 <sup>a</sup>	11.67±2.52 <sup>a</sup>
	L	9.77±4.72 <sup>a</sup>	10.97±3.33 <sup>b</sup>	0.77±0.2 <sup>a</sup>	258.02±18.88 <sup>a</sup>	10.67±2.08 <sup>a</sup>
	H	4.67±0.29 <sup>a</sup>	8.03±0.80 <sup>b</sup>	0.39±0.18 <sup>a</sup>	287.05±34.05 <sup>a</sup>	4.33±1.53 <sup>b</sup>

2.2.3 3种委陵菜地上部生长恢复情况 恢复15 d后,3种委陵菜地上部各生长指标均较践踏结束后次日升高,其中,轻度践踏下,绢毛匍匐委陵菜的株高增长率最高,为44.42%,鹅绒委陵菜的冠幅、生物量与母株叶片数的增长率最高,分别为27.98%、28.81%和25.86%;重度践踏下鹅绒委陵菜的株高、冠幅、生物量与母株叶片数的增长率均较其余2种委陵菜高(表5)。

## 2.3 3种委陵菜叶片生理特性对践踏胁迫的响应

2.3.1 3种委陵菜叶片相对含水量对践踏胁迫的响应 3种委陵菜叶片RWC随践踏强度的变化趋势不相同。重度践踏下,鹅绒委陵菜叶片RWC增加了2.32%,而绢毛匍匐和匍匐委陵菜叶片RWC分别减少了14.09%和2.79%(图2)。

2.3.2 3种委陵菜叶片REC及MDA含量对践踏胁迫的响应 轻度践踏下,匍匐委陵菜叶片REC显著升

表 5 3 种委陵菜地上部生长指标恢复情况

Table 5 Recovery of aboveground growth indexes of three *Potentilla* spp.

植物种类	处理	株高/cm	冠幅/cm	地上生物量/g	比叶面积/ (cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	母株叶片数
鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	CK	23.77±0.45 <sup>a</sup>	32.87±0.93 <sup>a</sup>	2.57±0.11 <sup>a</sup>	178.18±23.63 <sup>b</sup>	7.67±1.53 <sup>b</sup>
	L	20.17±1.42 <sup>b</sup>	31.07±1.82 <sup>a</sup>	2.32±0.25 <sup>a</sup>	186.82±0.98 <sup>b</sup>	10.00±1.00 <sup>a</sup>
	H	16.40±2.54 <sup>c</sup>	23.17±1.65 <sup>b</sup>	1.55±0.12 <sup>b</sup>	282.80±32.52 <sup>a</sup>	8.67±0.58 <sup>ab</sup>
绢毛匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i> var. <i>sericophylla</i>	CK	10.30±1.41 <sup>a</sup>	18.47±2.66 <sup>ab</sup>	1.81±0.33 <sup>a</sup>	257.25±41.07 <sup>a</sup>	15.67±1.53 <sup>b</sup>
	L	10.07±2.15 <sup>a</sup>	18.83±1.74 <sup>a</sup>	2.24±0.52 <sup>a</sup>	266.71±40.09 <sup>a</sup>	25.00±3.00 <sup>a</sup>
	H	6.33±2.16 <sup>a</sup>	14.63±1.33 <sup>b</sup>	0.95±0.28 <sup>b</sup>	263.3±61.06 <sup>a</sup>	15.67±2.52 <sup>b</sup>
匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i>	CK	10.63±4.29 <sup>a</sup>	17.40±2.69 <sup>a</sup>	1.51±0.40 <sup>a</sup>	289.84±22.88 <sup>a</sup>	12.00±1.00 <sup>a</sup>
	L	10.77±1.99 <sup>a</sup>	12.23±2.21 <sup>b</sup>	1.02±0.14 <sup>ab</sup>	260.33±19.81 <sup>a</sup>	11.33±2.52 <sup>a</sup>
	H	6.13±0.35 <sup>a</sup>	10.23±0.45 <sup>b</sup>	0.67±0.1 <sup>b</sup>	294.29±38.99 <sup>a</sup>	5.67±1.15 <sup>c</sup>

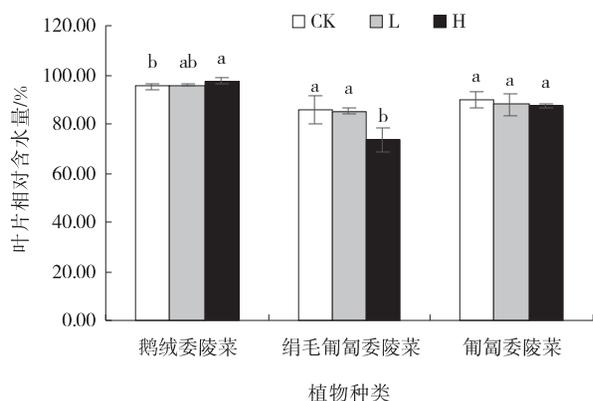


图 2 不同践踏胁迫下 3 种委陵菜叶片含水量的变化

Fig. 2 Changes of the relative water content in leaves of three *Potentilla* spp. under different trampling stress

高,绢毛匍匐委陵菜的 MDA 含量显著下降;重度践踏下,鹅绒、绢毛匍匐与匍匐委陵菜叶片 REC 均显著升高,分别增加了 284.55%、987.55% 和 354.41%,而 MDA 含量分别减少了 30.96%、17.91% 和 54.57% (图 3、图 4)。

2.3.3 3 种委陵菜叶片叶绿素含量对践踏胁迫的响

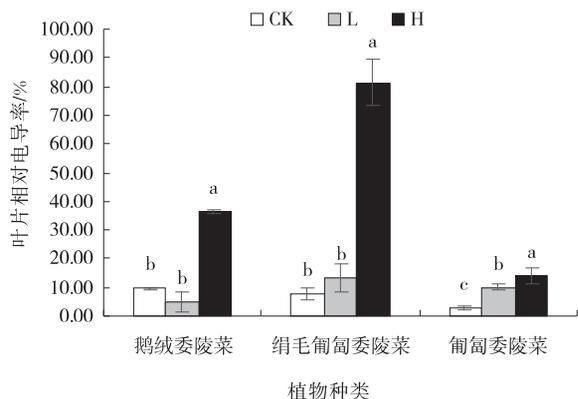


图 3 不同践踏胁迫下 3 种委陵菜叶片相对电导率的变化

Fig. 3 Changes of the relative conductivity in leaves of three *Potentilla* spp. under different trampling stress

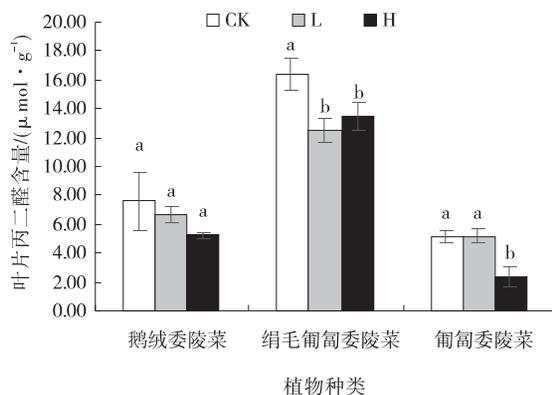


图 4 不同践踏胁迫下 3 种委陵菜叶片丙二醛含量的变化

Fig. 4 Changes of MDA content in leaves of three *Potentilla* spp. under different trampling stress

应 随践踏的增强,鹅绒委陵菜叶绿素含量先增加后减少,在轻度践踏下达到最大值,增加了 12.94%;绢毛匍匐委陵菜叶绿素含量持续下降,在重度践踏下,减少了 8.24% (图 5);匍匐委陵菜叶绿素含量并不显著。

2.3.4 3 种委陵菜叶片 SP 含量对践踏胁迫的响应

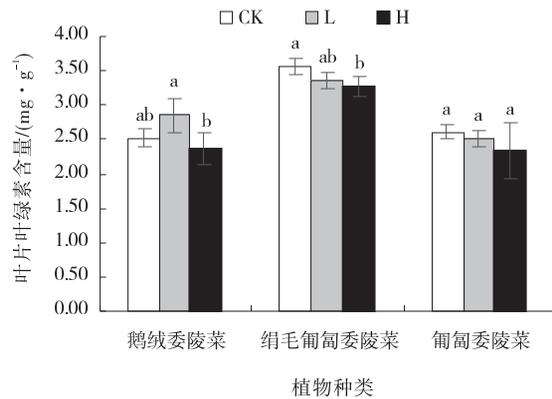


图 5 不同践踏胁迫下 3 种委陵菜叶片叶绿素含量的变化

Fig. 5 Changes of chlorophyll content in leaves of three *Potentilla* spp. under different trampling stress

鹅绒委陵菜和绢毛匍匐委陵菜的SP含量均随践踏的增强而降低,重度践踏下,分别减少了27.73%和33.80%;而匍匐委陵菜的SP含量先增加后减少,轻度践踏下增加了16.44%,重度践踏下减少了37.71%(图6)。

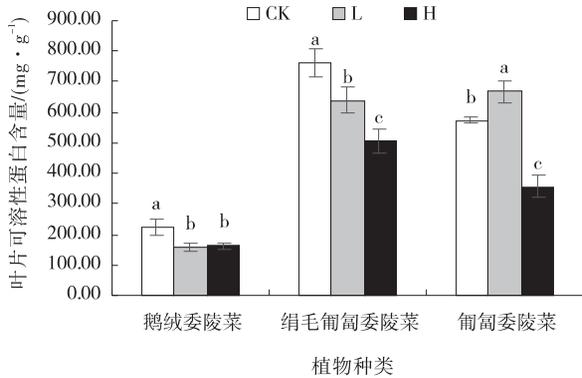


图6 不同践踏胁迫下3种委陵菜叶片可溶性蛋白含量的变化  
Fig. 6 Changes of soluble protein content in leaves of three *Potentilla* spp. under different trampling stress

2.3.5 3种委陵菜叶片SOD及POD含量对践踏胁迫的响应 随践踏强度增加,SOD活性在鹅绒委陵菜和匍匐委陵菜中无显著差异,而在绢毛匍匐委陵菜中显著下降(图7)。POD活性在3种委陵菜中均呈现出增加的趋势,其中,鹅绒委陵菜和绢毛匍匐委陵菜POD活性在轻度践踏下达到最大值,分别增加25.98%和41.63%,而匍匐委陵菜POD活性在重度践踏下达到最大值,增加了261.61%(图8)。

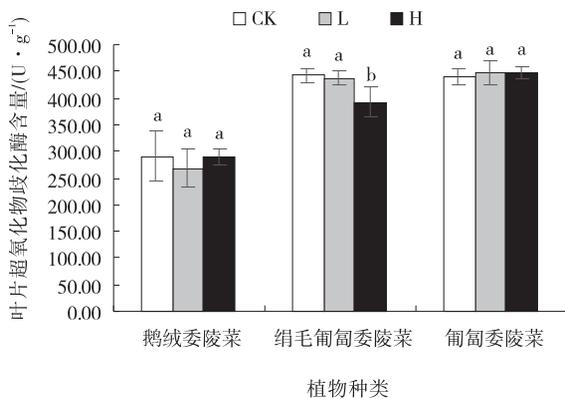


图7 不同践踏胁迫下3种委陵菜叶片超氧化物歧化酶含量的变化

Fig. 7 Changes of SOD content in leaves of three *Potentilla* spp. under different trampling stress

2.4 践踏胁迫下委陵菜生长生理指标与土壤物理性质的相关性分析

委陵菜地上部冠幅与土壤容重、紧实度与水分呈

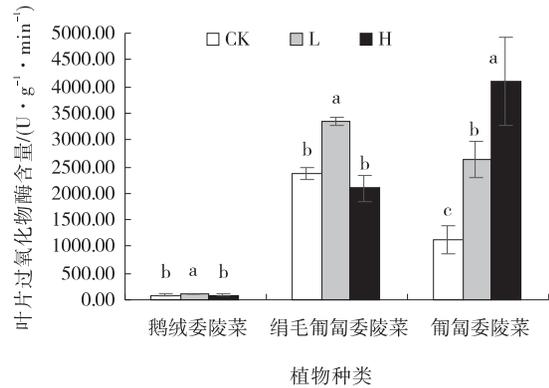


图8 不同践踏胁迫下3种委陵菜叶片过氧化物酶含量的变化  
Fig. 8 Changes of POD content in leaves three *Potentilla* spp. under different trampling stress

负相关,而与土壤总孔隙度及非毛管孔隙度呈正相关;母株叶片数与土壤总孔隙度存在正相关;地上、地下生物量与土壤紧实度和水分存在负相关,与土壤总孔隙度表现为正相关。地下部分根长与土壤紧实度表现为负相关;根数与土壤毛管孔隙度呈正相关;根直径与土壤水分呈负相关。就生理特性而言,叶片REC与土壤容重及紧实度间表现为正相关,与土壤总孔隙度间表现为负相关关系;MDA含量与土壤容重与水分存在负相关关系;SP含量与土壤容重与紧实度呈负相关(图9)。

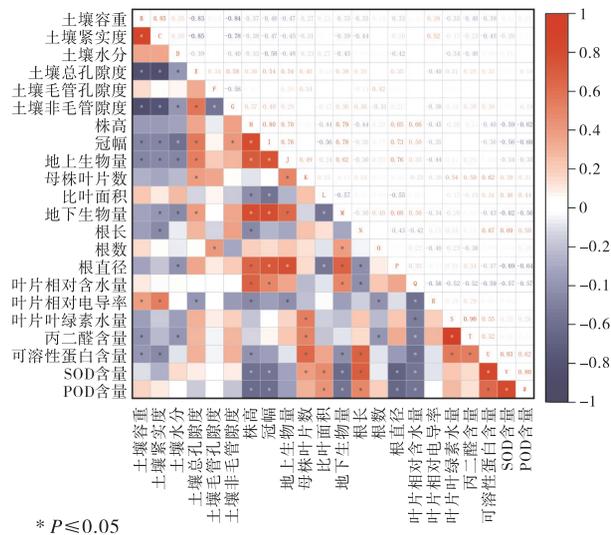


图9 土壤物理性质与委陵菜生长生理指标 Pearson 相关系数矩阵

Fig. 9 Pearson correlation coefficient matrix between soil physical properties and growth physiological indexes of *Potentilla*.

### 3 讨论

#### 3.1 土壤物理性质同委陵菜生长生理的耦合分析

3.1.1 践踏胁迫对土壤物理性质的影响 土壤是植物生长发育所需养分与水分的载体。已有研究表明,土壤容重、紧实度、水分及孔隙度等物理性质与践踏强度显著相关<sup>[17-18]</sup>。本研究中,随着践踏的增强,土壤容重与紧实度增加,总孔隙度与非毛管孔隙度降低。这与前人的研究结果一致<sup>[19-20]</sup>。土壤水分随践踏的增强呈现出升高的趋势,这可能是由于践踏导致土壤紧实度增加,水分无法下渗,因而表层土壤含水量升高<sup>[21]</sup>。

3.1.2 践踏胁迫下土壤物理性质变化对委陵菜生长生理的影响 研究表明,土壤物理性质的改变与植物生长生理存在一定的相关性<sup>[20]</sup>。本研究中,土壤容重、紧实度、孔隙度等与委陵菜的生物量、冠幅、根系构型特征、REC、SP及MDA含量间存在相关关系。这可能是由于践踏引起的土壤紧实使得土壤容重增加、非毛管孔隙度下降,阻碍了根系的伸长与对水分的吸收,从而导致地上部生物量减少、冠幅减小,生长受到抑制<sup>[22]</sup>,而水分变化又通过影响叶片渗透调节系统与膜系统影响了委陵菜叶片生理过程。

#### 3.2 委陵菜生长与生理特性对践踏胁迫的响应

3.2.1 委陵菜生长特性对践踏胁迫的响应 植物生长指标是直接反映其逆境适应性的重要指标。本研究中,3种委陵菜地上部株高、冠幅与生物量均随践踏强度的增加而减小,这与前人在其他草坪地被植物耐践踏性研究中的结果相一致<sup>[23-25]</sup>。地下部随践踏的增强,生物量和根直径减小,而根数则在轻度践踏下显著增加。在一定范围内随着土壤紧实度的增加,根系表面与土壤接触更紧密,促进了其对水分的获取,促进了新根的萌发。邢强等<sup>[26]</sup>、奇凤等<sup>[27]</sup>与朱振亚<sup>[7]</sup>在对其他植物的研究中同样发现轻中度的践踏刺激了植物根系的萌发;此外,有研究表明土壤紧实度的增加会改变根系空间分布格局,抑制根系的伸长与增粗,造成了根生物量的减少与根系表层化<sup>[28-29]</sup>。

植物受践踏后的恢复能力是其耐践踏性强弱的重要体现。本研究中,在15天恢复期后,经轻度践踏的3种委陵菜地上部生长能基本恢复到与对照组一致的水平,而经重度践踏的3种委陵菜株高、冠幅及生物

量均低于对照组。表明植物在重度践踏下受到的伤害较大并难以短时间内自然恢复。就恢复表现而言,鹅绒委陵菜的各项指标增长率较高,恢复较快。

3.2.2 委陵菜生理特性对践踏胁迫的响应 践踏造成植物叶片机械损伤,破坏其细胞膜透性。随着践踏的增强,3种委陵菜叶片REC升高,MDA含量降低。为应对践踏引起的水分流失,植物会积累有机物以降低渗透势。本研究中,匍匐委陵菜的SP含量先升高后下降,其余2种委陵菜的SP含量持续下降。SP是重要的渗透调节物质,而前人研究中其含量随践踏胁迫存在不同的变化趋势<sup>[30-31]</sup>。我们推测其变化的差异性可能与植物自身耐践踏强弱及践踏强度的设计相关。在轻度践踏下,植物通过提高SP含量以启动渗透调节减少水分流失。但随胁迫的增强,植物叶片细胞丧失自我调节能力,SP降解<sup>[12]</sup>。此外,有研究认为胁迫抑制了蛋白质的合成并诱导蛋白质降解,使SP含量降低<sup>[32]</sup>。

研究表明践踏胁迫下,植物叶绿素含量在一定范围内增加<sup>[33]</sup>。本研究中,轻度践踏下鹅绒委陵菜叶绿素含量增加,重度践踏下绢毛匍匐委陵菜叶绿素含量降低。奇凤等<sup>[34]</sup>同样研究发现轻度践踏促进了高羊茅(*Festuca arundinacea*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*)叶绿素的积累,重度践踏使两种草坪草叶绿素含量降低。有研究认为践踏胁迫使细胞质膜透性增加,叶绿素活性与含量下降,进而降低植物光合速率<sup>[35]</sup>。

逆境环境中植物会启动抗氧化系统,其中,SOD将 $\cdot\text{O}_2^-$ 转化成 $\text{O}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2$ ,POD清除 $\text{H}_2\text{O}_2$ <sup>[36]</sup>。本研究中,3种委陵菜中SOD的变化并不显著;而POD随践踏的增强而增加,表明践踏胁迫下委陵菜主要通过POD清除活性氧以维持平衡。郭嘉<sup>[12]</sup>和奇凤等<sup>[34]</sup>研究发现不同植物中同种酶活性和同种植物中不同酶活性的响应灵敏度存在差异,同等践踏强度下,POD对践踏胁迫的响应灵敏度大于SOD。

### 4 结论

轻度践踏下,委陵菜通过增加根数、提高SP与POD含量,减少水分流失、清除活性氧以应对胁迫;重度践踏下,其生长与生理活动均受到抑制,且短时间内难以恢复。综合生长生理响应与恢复情况,鹅绒委陵菜的耐践踏性较另外两种委陵菜强。上述研究结

果也为园林中依据游客量与践踏频率因地制宜选择地被植物种类提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 张彦芬,吴学明,高辉,等. 青藏高原东北部鹅绒委陵菜资源及开发利用前景的研究[J]. 西北农业学报, 2006, 15(3):193—196,200.
- [2] 王峥,钱璟,沈思栋,等. 公园绿地微生境对绢毛匍匐委陵菜花期生长发育的影响[J]. 草原与草坪, 2023, 43(2): 42—50.
- [3] 董洁,王康,董宽虎. 不同践踏程度对观赏草坪的影响[J]. 中国草地学报, 2008, 30(2):93—97.
- [4] Smith P E. The Functional Response of Plants to Trampling Pressure [D]. England: Keele University (United Kingdom), 1978.
- [5] 戴其根,周兰胜,许轲. 耐践踏草坪草研究进展[J]. 福建林学院学报, 2004, 24(3):270—273.
- [6] 程转宏,赵树兰,多立安. 3种野生地被植物对践踏胁迫的生理生态响应特征[J]. 植物研究, 2008, 28(5): 614—617.
- [7] 朱振亚. 东北百里香耐践踏性及克隆生长特性研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2011.
- [8] 赵婵璞. 两种委陵菜的适应性研究[D]. 保定:河北农业大学, 2014.
- [9] 轩弋淳. 根茎及匍匐茎植物对践踏及土壤紧实度的响应机制[D]. 长春:吉林大学, 2014.
- [10] 马国良,汤青川,沈宁东,等. 不同践踏强度对鹅绒委陵菜地上部生长的影响[J]. 北方园艺, 2012, (23): 81—85.
- [11] 常乐,夏宜平,楼建华,等. 践踏胁迫对4种园林地被植物叶绿素荧光特性的影响[J]. 园艺学报, 2010, 37(10): 1673—1678.
- [12] 郭嘉. 金叶过路黄生长、生理对践踏胁迫的响应研究[D]. 成都:四川农业大学, 2015.
- [13] 张建军,朱金兆. 水土保持监测指标的观测方法[M]. 北京:中国林业出版社, 2013:63—66.
- [14] Weatherley P E. Studies in the water relations of the cotton plant I. The field measurement of water deficits in leaves[J]. New Phytologist, 1950, 49(1):81—97.
- [15] Xu L, Pan Y, Yu F. Effects of water—stress on growth and physiological changes in *Pterocarya stenoptera* seedlings[J]. Scientia Horticulturae, 2015. 190: 11—23.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:167—169.
- [17] 吕娇. 北京公园常见森林类型与人为活动对土壤水分的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- [18] 董一桥. 人为践踏对南京紫金山林下植被根系及土壤渗透性影响[D]. 南京:南京林业大学, 2021.
- [19] 李丹丹,宗俊勤,郭海林,等. 不同坪床配比对‘阳江’狗牙根草坪耐践踏性的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(8): 72—83.
- [20] 薛建,邢强,成文竞. 践踏对2种草坪草土壤物理性质与根系的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(2):448—455.
- [21] Sills M J, Carrow R N. Turfgrass Growth, N Use, and Water Use under Soil Compaction and N Fertilization1 [J]. Agronomy Journal, 1983, 75(3):488—488.
- [22] 周兰胜,戴其根,张洪程等. 不同践踏强度对狗牙根和马尼拉形态生理的影响. [J]. 草业科学, 2005, 22(12): 77—81.
- [23] Franziska K. Seer, Ulrich Irmeler, Joachim Schrautzer. Effects of trampling on beach plants at the Baltic Sea [J]. Folia Geobotanica, 2015, 50(4): 303—315.
- [24] Barros A, Pickering C M. Impacts of experimental trampling by hikers and pack animals on a high—altitude alpine sedge meadow in the Andes[J]. Transactions of the Botanical Society of Edinburgh, 2015, 8(2):265—276.
- [25] 何淑嫻,李伟,程希平,等. 践踏干扰对碧塔海高寒草甸植被茎叶性状、物种多样性和功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(6):2063—2070.
- [26] 邢强,秦俊,胡永红. 不同践踏强度对3种暖季型草坪草的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(2):52—61.
- [27] 奇凤,郑扬帆,宋桂龙. 践踏对坪用高羊茅和草地早熟禾生长的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(7):1007—1013.
- [28] 樊博,林丽,曹广民,等. 不同演替状态下高寒草甸土壤物理性质与植物根系的相互关系[J]. 生态学报, 2020, 40(7):2300—2309.
- [29] 宋桂龙. 践踏对足球场草坪草生长和生理影响的研究[D]. 北京:北京林业大学, 2003.
- [30] 王玲,刘桂伶,朱振亚,等. 践踏胁迫对东北百里香种群主要数量特征及生理的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(9):1659—1665.
- [31] 杨小琴,毛芮,刘金平,等. 践踏频率对千根草构件性状及生理代谢的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(12):2372—2380.
- [32] 白志英,李存东,刘渊. 干旱胁迫下小麦叶片脯氨酸和蛋白质含量变化与染色体的关系[J]. 植物遗传资源学报, 2007, (3):325—330.
- [33] 周守标,王晖. 践踏胁迫对两种暖地型草坪草叶片形态

- 及生理的影响[J]. 草业学报, 2004(5): 70—74.
- [34] 奇凤. 践踏处理对高羊茅(*Festuca arundinacea*)和草地早熟禾(*Poa pratensis* L.)分蘖生长影响及生理调控研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [35] 刘俊羽, 杨帆, 毛爽, 等. 植物脂质应答逆境胁迫生理功能的研究进展[J]. 生物工程学报, 2021, 37(8): 2658—2667.
- [36] 田敏, 饶龙兵, 李纪元. 植物细胞中的活性氧及其生理作用[J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(2): 235—241.

## Study on growth and physiological responses of *P.anserina*, *P.reptans* var.*sericophylla* and *P.reptans* to trampling stress

ZENG Si-qi<sup>1</sup>, CHEMG Lan<sup>1</sup>, ZHANG Xue-ru<sup>2</sup>, YI Wen-fei<sup>1</sup>, FAN Shu-xin<sup>1</sup>,  
DONG Li<sup>1\*</sup>

(1. *Beijing forestry university, Beijing 100083, China*; 2. *Beijing JichengZhizao Technology Co. , Beijing 100083, China*)

**Abstract:** 【Objective】 This study provided a theoretical basis for the garden application of three *Potentilla* spp. and provided groundcover plant resources for the construction of green gardens. 【Method】 *Potentilla anserina*, *P. reptans* var. *sericophylla* and *P. reptans* were used as experimental materials. After no trampling (CK), light trampling (L) and heavy trampling (H), we measured the growth, physiological and soil indexes, and correlation analysis was carried out. 【Result】 With the increase of trampling, soil bulk density and compaction increased, total porosity and non-capillary porosity decreased. The aboveground growth of three *Potentilla* spp. was characterized by a decrease in plant height, crown width and biomass, while subsurface growth was characterized by a decrease in biomass and an increase in the number of roots. Physiological indicators showed that leaf REC increased, POD content increased, MDA content decreased, leaf RWC and chlorophyll content decreased in *P. reptans* var. *sericophylla*, SP content increased first and then decreased in *P. reptans*, and continued to decrease in other two *Potentilla* spp. The results of correlation analysis show that crown width was negatively correlated with soil bulk density, compactness and water content, positively correlated with soil total porosity and non-capillary porosity. There was a negative correlation between above-ground and subsurface biomass, soil compactness and water content, and a positive correlation between above-ground and subsurface biomass and total soil porosity. There were correlations between root configuration and soil compactness, capillary porosity and water. 【Conclusion】 Under light trampling, three *Potentilla* spp. increased the number of fibrous roots, soluble protein and POD content to reduce water loss, clear reactive oxygen to cope with stress; however, both growth and physiological activities were significantly suppressed under heavy trampling, and difficult to recover in a short time. Based on the growth and physiological responses and recovery performance, the trampling tolerance of *P. anserina* is stronger than the other two. The above results also provided a reference for groundcover plant selection according to visitor arrivals and trampling frequency in green gardens.

**Key words:** *Potentilla anserina*; *Potentilla reptans* var. *sericophylla*; *Potentilla reptans*; trampling stress; growth and physiological response; soil

(责任编辑: 康宇坤)