

不同水分处理下紫花苜蓿刈割后 残茬的光合变化及其机制

何树斌, 刘国利, 杨惠敏*

(兰州大学草地农业科技学院 农业部草地农业生态系统学重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要:以紫花苜蓿为研究对象,测定了不同水分处理下牧草刈割后残茬光合作用、膜脂过氧化、渗透调节物质及抗氧化酶类物质的变化,初步探讨了刈割后紫花苜蓿光合变化的机制。刈割后较短时间内紫花苜蓿光合速率(Pn)可恢复甚至上升,气孔导度(g_s)也有不同程度的增加;刈割后10 h,紫花苜蓿丙二醛(MDA)含量下降明显,而脯氨酸(proline)含量增加显著;抗氧化酶(SOD、POD和CAT)活性在刈割后总体迅速上升。不同水分处理下有相同变化趋势,但不同水分处理间差异显著。刈割可能缓解了水分胁迫,减弱了膜脂过氧化程度;渗透调节物质增多,增强了抵抗“刈割”刺激/胁迫的能力;抗氧化酶活性的总体增高,提高了清除“刈割”产生的活性氧的能力,有助于维护光合细胞膜的完整性。总之,细胞膜脂过氧化的减弱、活性氧清除的加强和抵抗胁迫能力的提高,保证了植物器官功能(如气孔运动)的正常甚至超常发挥,从而导致刈割后紫花苜蓿残茬迅速恢复甚至提高光合能力。

关键词:刈割;水分胁迫;紫花苜蓿;光合作用;再生机制

中图分类号:S551⁺7;Q945.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5759(2009)06-0192-06

* 刈割是草地利用的主要方式之一,对牧草的生长发育有很大影响。适度的刈割(或放牧)干扰可能对植物产生有利影响,植物在遭受干扰后可进行相应的反应,保证生长和生存。有学者将植物受损伤后的积极反应定义为超补偿生长^[1],如刈割后植物的生物量干重(包括移去的部分)与未受采食或刈割的相比要多的现象。研究表明,超补偿现象的发生在不同物种上不同,在地理环境的分布和时间的差异上也是不同的^[2]。因此,补偿现象的发生机制一直以来都是人们研究的热点^[3,4]。

光合作用是植物生物量干重增加的基础,也是补偿生长的一个重要方面。研究表明,刈割后残余叶片的光合速率将增高,而且可能会在较长时间内保持较高速率^[5~11]。光合速率的恢复、提高或者保持保证了刈割后牧草物质的足够积累,有助于再生的顺利进行。但是,对光合变化的机理性解释还有待于深入探讨。此外,较多的刈割研究以禾本科牧草为研究对象,如多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)^[12]和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)^[13]等,对豆科牧草(如紫花苜蓿)在刈割后光合生理响应及机制方面的报道却少见。

随着农业结构的调整,以及国家“退耕还林还草”等政策的实施,刈割越来越成为主要的牧草收获和利用方式。紫花苜蓿作为重要的优良牧草种在草产业中的重要性日益凸现。在我国西北干旱、半干旱地区,水分缺乏已成为影响农业系统产量和品质的主要限制因子;而紫花苜蓿的种植利用可极大地缓解农业系统的压力。因此,研究刈割后紫花苜蓿的光合响应及机理在放牧生态学和牧草栽培、管理和利用方面具有一定的指导意义。本研究通过观测水分胁迫下刈割后紫花苜蓿光合及相关生理指标的变化,探讨紫花苜蓿光合能力对刈割的响应及其机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以紫花苜蓿新疆大叶(*Medicago sativa* cv. Xinjiangdaye)为试验材料。种子由国家农业部牧草与草坪种子质量监督检验测试中心提供。

* 收稿日期:2008-11-05;改回日期:2009-04-01

基金项目:973计划课题(2007CB108901),教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20070730032)和兰州大学引进人才计划课题资助。

作者简介:何树斌(1983-),男,甘肃武威人,在读博士。E-mail: heshubin215@163.com

* 通讯作者。E-mail: huimyang@lzu.edu.cn

1.2 试验设计

试验中的水分和刈割处理见表 1, 水分处理定为田间持水量 (field water capacity, FWC) 的 35% 和 70%; 同一水分下分刈割与不刈割处理。

试验采用盆栽结合室内测定的方法完成。盆栽试验选用直径 30 cm、高 40 cm 的塑料盆, 内装取自大田的耕层土。装土前, 按氮磷比 1:4 比例添加肥料, 混匀, 每盆装入 15 kg 土。试验于 2007 年 4 月 8 日播种, 5 月 10 日每盆定苗 30 株。试验期内用电子秤称重法控制水分, 每 2~3 d 浇水 1 次, 保证每个处理的土壤含水量达到田间最大持水量的 35% 和 70%。生化指标的测定在室内完成。在刈割前和刈割后 5, 10 和 30 h 采摘残茬的健康叶片, 准确称量 0.5 g, 用纸包好迅速投到液氮冷冻以待测定。

1.3 指标测定

1.3.1 光合作用测定 在紫花苜蓿盛花期, 选择晴朗的天气, 上午 7:00 用大剪刀以 10 cm 留茬刈割。之后, 从 7:00—17:00 每隔 2 h 用 LI-6400 光合仪 (Li-Cor, NE, USA) 测定残茬健康叶片的光合参数, 主要包括: 叶片净光合速率 (P_n , $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 和气孔导度 (g_s , $\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 等。每处理测定 6~8 个叶片, 每叶片测定 5 次。

1.3.2 丙二醛含量测定 参照 Du 和 Bramlage^[14] 的方法测定丙二醛 (MDA) 含量。

1.3.3 脯氨酸含量测定 参照 Bates 等^[15] 的方法测定脯氨酸 (proline) 含量。

1.3.4 抗氧化酶活性测定 称取 0.2 g 叶片, 加 2.0 mL 50 mmol/L 的磷酸缓冲液 (pH 值 7.8, 含 1% 不溶性聚乙烯吡咯烷酮), 冰浴上研磨成匀浆, 在低温离心机上 10 000 r/min 离心 20 min。取上清液 4℃ 保存, 备用。参照陈建勋和王晓峰^[16] 的方法测定超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性。

1.4 数据统计处理

用 Excel for Windows 和 SPSS 软件进行数据统计和方差分析。

2 结果与分析

2.1 刈割后紫花苜蓿 P_n 的变化

刈割后 2 h 内, 刈割处理的 P_n 与未刈割的无显著差异; 刈割后 2~4 h, 刈割处理的 P_n 显著低于未刈割的; 而在刈割 4 h 后, 刈割处理的 P_n 显著高于未刈割的 (表 2)。70% FWC 下刈割处理当日日平均 P_n 为 $5.3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 未刈割的为 $3.9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 即刈割导致日平均 P_n 升高 35.8%。在 35% FWC 下, 刈割处理当日日平均 P_n 为 $4.57 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 未刈割的为 $4.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 即刈割导致日平均 P_n 升高 17.4%。刈割后 4 h 内, 70% FWC 下的 P_n 小于 35% FWC 下的; 而刈割 4 h 后则相反。结果表明, 刈割后较短时间内, 紫花苜蓿的光合能力不仅可以恢复, 而且可能有所提高。

2.2 刈割后紫花苜蓿 g_s 的变化

刈割后 4 h 内, 刈割处理的 g_s 低于未刈割的; 刈割 4 h 后, 刈割处理的 g_s 高于未刈割的 (表 3)。70% FWC 下, 刈割后 8 h, 刈割处理的 g_s 显著高于未刈割的 ($P < 0.05$); 35% FWC 下, 刈割后 6 h, 刈割处理的 g_s 显著高于未刈割的 ($P < 0.05$)。刈割后 4 h 内, 70% FWC 下的 g_s 小于 35% FWC 下的; 而刈割 4 h 后则相反。结果表明, 刈割后气孔开度增大可能导致了 g_s 增加。

2.3 刈割后紫花苜蓿 MDA 和脯氨酸含量的变化

刈割后 MDA 含量有不同程度的降低 (图 1)。在 2 种水分处理下, 刈割后 10 h 时 MDA 含量显著减小 ($P < 0.05$), 且 70% FWC 下的 MDA 减少量要大于 35% FWC 下的。刈割前后, 70% FWC 下的 MDA 含量显著或极显著低于 35% FWC 下的。上述结果表明, 刈割后膜脂过氧化可能减弱。

刈割后脯氨酸含量有不同程度的升高 (图 2)。在 2 种水分处理下, 刈割后 10 h 时脯氨酸含量显著升高 ($P < 0.05$), 且 70% FWC 下的脯氨酸增加量要大于 35% FWC 下的。刈割前后, 70% FWC 下的脯氨酸含量显著或极显著低于 35% FWC 下的。上述结果表明, 刈割后渗透调节物质含量增加, 增强了抵抗“刈割”刺激/胁迫的能力; 水分胁迫下渗透调节处在较高水平。

表 1 盆栽试验设计

Table 1 Pot experiment design

处理 Treatment	不刈割 Uncutting	刈割 Cutting
70% 田间持水量 70% FWC	A	B
35% 田间持水量 35% FWC	C	D

表 2 不同处理下净光合速率变化

Table 2 Pn changes under different

时间 Time (HAC)	treatments $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$			
	A	B	C	D
0	4.15±0.90	3.65±1.20	4.83±1.69	4.60±1.68
2	6.38±2.42	7.37±1.31	8.93±0.55	7.92±1.38
4	5.70±2.70	3.24±0.84*	7.83±1.81	3.46±1.36**
6	8.95±1.48	10.93±0.85*	3.82±1.70	10.56±2.80**
8	1.62±1.00	5.19±1.14**	0.87±0.35	3.67±1.79*
10	0.43±0.12	4.64±2.30**	1.16±0.30	2.19±1.20
12	0.10±0.09	2.12±1.30*	-0.13±0.11	-0.34±0.28

表 3 不同处理下气孔导度变化

Table 3 Stomatal conductance changes under

时间 Time (HAC)	different treatments $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$			
	A	B	C	D
0	0.08±0.02	0.06±0.01	0.09±0.01	0.14±0.01
2	0.12±0.09	0.18±0.01	0.16±0.06	0.15±0.01
4	0.13±0.03	0.08±0.01*	0.13±0.02	0.10±0.01
6	0.21±0.01	0.24±0.02	0.07±0.02	0.17±0.01*
8	0.06±0.01	0.19±0.06*	0.04±0.01	0.11±0.01*
10	0.06±0.02	0.17±0.05*	0.02±0	0.06±0.01
12	0	0.10±0.01	0	0

HAC: 刈割后时间(h); Pn: 光合速率; A: 70% FWC+不刈割; B: 70% FWC+刈割; C: 35% FWC+不刈割; D: 35% FWC+刈割; FWC: 土壤田间持水量。* 和 ** 表示刈割和不刈割处理间差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)。

HAC: Hours after cutting; Pn: Leaf net photosynthetic rate; A: 70% FWC+uncutting; B: 70% FWC+cutting; C: 35% FWC+uncutting; D: 35% FWC+cutting; FWC: Field water capacity. * and ** show significant ($P < 0.05$) or very significant ($P < 0.01$) difference between cutting and uncutting treatments.

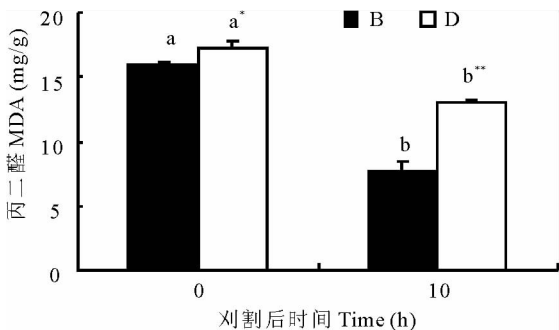


图 1 不同处理下紫花苜蓿叶片丙二醛含量变化

Fig. 1 Change in leaf MDA content of lucerne under different treatments

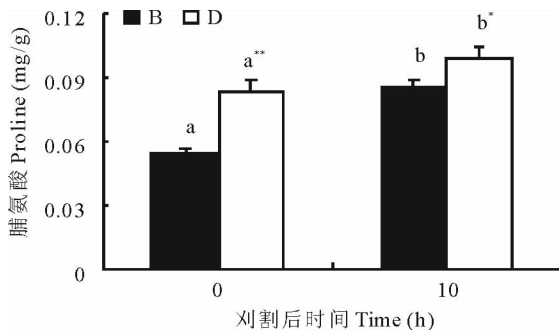


图 2 不同处理下紫花苜蓿叶片脯氨酸含量变化

Fig. 2 Change in leaf proline content of lucerne under different treatments

MDA: 丙二醛 Malondialdehyde. 所有数据为 6 次重复的平均值和标准误, 不同小写字母表示不同时间点间差异显著 ($P < 0.05$), * 和 ** 分别表示水分处理间差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)。下同 All values indicate mean of 6 independent experiments and error bars show standard error (s. e.). Different small letters show significant difference ($P < 0.05$) between time points. * and ** show significant ($P < 0.05$) and very significant ($P < 0.01$) difference between two water treatments. The same below

2.4 刈割后紫花苜蓿抗氧化酶 SOD, POD 和 CAT 活性变化

刈割后抗氧化酶活性有不同程度变化, 总体活性在刈割后迅速增加; 在 2 个水分处理下, 刈割后抗氧化酶活性变化趋势一致(图 3)。SOD 和 CAT 活性(图 3a 和 3c)在刈割后 10 h 内显著上升 ($P < 0.05$), 但在 10 h 后又显著下降 ($P < 0.05$)。70% FWC 下, POD 活性(图 3b)在刈割后 5 h 内显著上升 ($P < 0.05$), 但在 5~10 h 内又显著下降 ($P < 0.05$), 在 10 h 后又显著上升 ($P < 0.05$); 35% FWC 下, POD 活性 0~10 h 内一直下降, 刈割 10 h 后显著上升 ($P < 0.05$)。70% FWC 下, 刈割后 0 h 时 ($P < 0.05$) 和 10 h 后 ($P < 0.01$) SOD 和 CAT 活性均高于 35% FWC 下的, 而在 0~10 h 间后者较高 ($P < 0.01$, 刈割后 5 h; $P < 0.05$, 刈割后 10 h); 70% FWC 下, POD 活性在刈割后 10 h 前均 ($P < 0.01$, 刈割后 0 h; $P < 0.05$, 刈割后 5 h) 低于 35% FWC 下的, 而刈割后 30 h 则相反 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 刈割对紫花苜蓿光合能力的影响

在干旱半干旱地区,水是制约植物生长的主要因素,水分亏缺导致气孔关闭、蒸腾速率减小、Pn 下降,最终植物生长停止、死亡。刈割后,植物地上地下平衡的破坏使得刈割植物受水分的胁迫较小,光合能力可能因而增强。本研究证实了这一点。枝叶受到刈割或采食后,被刈割植物叶面积减小,而剩余叶片单位面积含氮量和含水量分别比未刈割的高 40% 和 20%^[17,18],同时,刈割也导致根冠比失调和源库关系改变、剩余叶片中叶绿素含量^[19]及细胞分裂素和光合酶的活性增加等^[6],从而引起叶片光合能力的增强。此外,刈割后冠层微气候得到改善^[8],植物可得到更多的资源,从而表现出光合增强的现象。而且,刈割在一定程度上可减少牧草因叶片枯萎死亡造成的损失^[20],从而表现为超补偿光合作用的发生。紫花苜蓿刈割后 g_s 的增加可能是较短时间内 Pn 提高的主要原因。 g_s 的增加保证了 CO_2 的充分供应,为 Pn 的提高打下了物质基础。光合能力的提高有力地促进了刈割后紫花苜蓿的再生。

3.2 刈割对紫花苜蓿叶片细胞膜的影响

MDA 是膜脂过氧化作用的最终产物,是膜系统受伤害的重要标志之一^[21]。MDA 积累越多表明组织的保护能力越弱^[22]。MDA 含量的增加说明植物的保护机制不能有效修补活性氧对植物膜系统造成的破坏,水分亏缺影响膜的组成和更新。本研究发现,70% FWC 下的牧草残茬在刈割后 10 h 时 MDA 含量比刈割前显著减小。在干旱和半干旱地区,植物能否从土壤中获得更多的水分是植物生长的主要制约因素。从试验区去除植物后,土壤水势增加^[23],因此,刈割导致紫花苜蓿整体叶片的蒸腾失水减少,同时也启动了紫花苜蓿的再生响应,根系能在短时间内吸收大量的水分,从而缓解了先前干旱胁迫对它的影响。由于刈割前长期的干旱胁迫,35% FWC 下的紫花苜蓿较 70% FWC 下的可能有更为发达的根系。因此,在刈割后短期内凭借其发达的根系能获得更多的水分和养分,但 35% FWC 下 MDA 减少的量要少。说明长期处于干旱胁迫下的紫花苜蓿抵御刈割伤害的能力可能较弱。

3.3 刈割对紫花苜蓿细胞渗透势的影响

干旱、高盐、高温及重金属等非生物胁迫条件都会导致植物体内脯氨酸含量的增加,其作用是防止渗透胁迫对植物造成的伤害、清除自由基^[24]。在干旱期间,通过可溶物的积累来进行渗透调节,较低的水势使植物在不失去膨压的情况下维持叶片的蒸腾压力^[25]和细胞体积^[26]。本研究发现,2 个水分处理下刈割后 10 h 时脯氨酸含量均有显著的上升。一方面,脯氨酸含量的增加说明刈割对紫花苜蓿造成了伤害。因为脯氨酸是可溶性溶质中唯一可以保护植物免受单线态氧和自由基伤害的分子,可以整合单线态氧,高效地清除羟自由基^[27,28]。另一方面也说明,光合相关细胞中脯氨酸含量的增加促使光保护机制将大量的光能以热能的形式消耗^[29,30],避免光合细胞受损。从而在细胞水平上保证了具有较高光合作用的发生。35% FWC 下的紫花苜蓿较 70% FWC 下积累

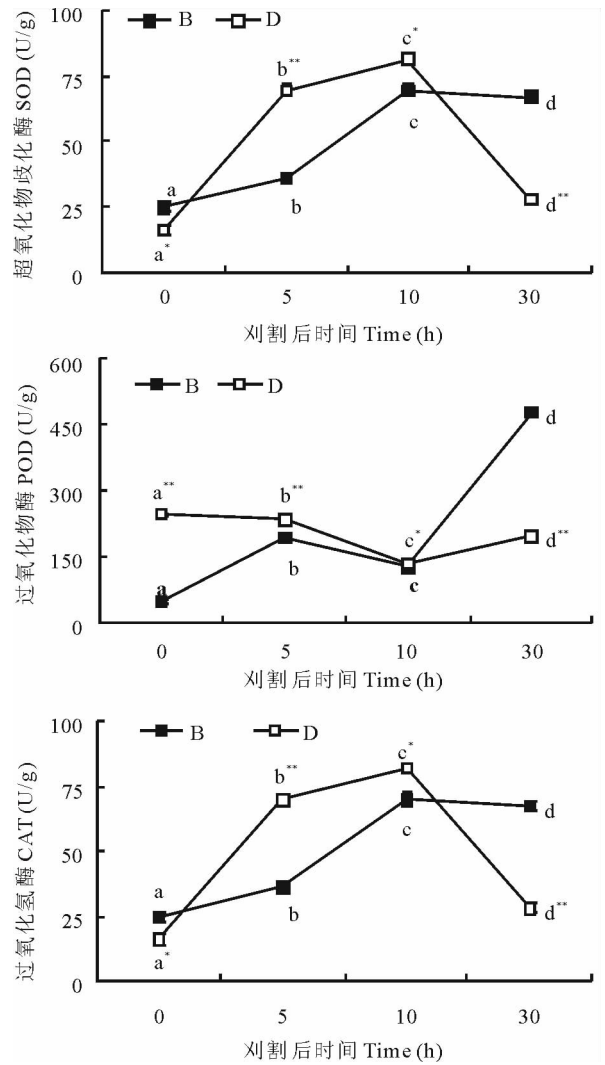


图 3 不同处理下紫花苜蓿叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的变化

Fig. 3 Changes of SOD, POD and CAT activities in leaf of lucerne under different treatments

的脯氨酸要多,而刈割后 10 h 增加的要少,说明长期处于干旱胁迫下的紫花苜蓿渗透调节水平可能较高,但抵御刈割伤害的能力可能较弱。

3.4 刈割对抗氧化酶系统及其防御机制的影响

植物在遭受逆境胁迫时产生的大量活性氧若不加以清除,植物将受到严重的氧化伤害,因此,应对胁迫时,植物将动员抗氧化防御系统以保护细胞免遭伤害。SOD、POD 和 CAT 是该系统中最重要的 3 个酶,其中 SOD 催化 2 个超氧自由基发生歧化反应形成 $O_2 \cdot$ 和过氧化氢(H_2O_2),产生的 H_2O_2 再由 POD 和 CAT 分解除去^[31,32]。本研究中,刈割后 SOD 和 CAT 活性均迅速增加而 POD 活性最终也会增加。说明“刈割”刺激使牧草面临逆境因而产生大量活性氧,同时也启动了活性氧清除反应和牧草的再生信号传递。活性氧的有效清除在细胞水平上保证了光合细胞膜的完整性,从而确保刈割后植物仍具有较高水平的的光合,有助于牧草正常生理的恢复和再生。在不同水分处理下,35%FWC 下的牧草比 70%FWC 下的在刈割后较短的时间(刈割后 10 h)内 SOD 和 CAT 活性要高,而在刈割 10 h 后活性却更低。可能低水分处理下的牧草拥有较为发达的根系,在刈割后较短的时间内调整水分平衡,因此,部分抗氧化酶平衡状态迅速恢复。而 POD 活性在刈割后 10 h 前趋于下降,说明在 POD 与 SOD 和 CAT 活性之间可能有权衡,因此,POD 活性在刈割 10 h 后又上升而此时其他二者活性下降。

参考文献:

- [1] Belsky A J. Does herbivory benefit plants: A review of the evidence[J]. American Naturalist, 1986, 127: 870-892.
- [2] Paige K N. Regrowth following ungulate herbivory in *Ipmopsis aggregata*: Geographic evidence for overcompensation[J]. Oecologia, 1999, 118: 316-323.
- [3] Freeman R S, Brody A K, Neefus C D. Flowering phenology and compensation for herbivory in *Ipomopsis aggregata* [J]. Oecologia, 2003, 136: 394-401.
- [4] Sharaf K E, Price M V. Does pollination limit tolerance to browsing in *Ipomopsis aggregate*[J]. Oecologia, 2004, 138: 396-404.
- [5] Nowak R S, Coldwell M M. A test of compensatory photosynthesis in the field: Implications for herbivory tolerance[J]. Oecologia, 1984, 61: 311-318.
- [6] von Caemmerer S, Farquhar G D. Effects of partial defoliation, changes of irradiance during growth, short-term water stress and growth at enhanced $p(CO_2)$ on the photosynthetic capacity of leaves of *Phaseolus vulgaris* L. [J]. Planta, 1984, 160: 320-329.
- [7] Richards J H, Caldwell M M. Soluble carbohydrates, concurrent photosynthesis and efficiency in regrowth following defoliation: A field study with *Agropyron species*[J]. Journal of Applied Ecology, 1985, 22: 907-920.
- [8] Mabry C M, Wayne P W. Defoliation of the annual herb *Abutilon theophrasti*: Mechanisms underlying reproductive compensation[J]. Oecologia, 1997, 111: 225-232.
- [9] Thomson V P, Cunningham S A, Ball M C, et al. Compensation for herbivory by *Cucumis sativus* through increased photosynthetic capacity and efficiency[J]. Oecologia, 2003, 134: 167-175.
- [10] 姜华, 毕玉芬, 何承刚. 不同时期刈割对黑麦草生产性能、蛋白质含量及光合效率的影响[J]. 云南农业大学学报, 2003, 18: 149-152.
- [11] Gassmann A J. Effect of photosynthetic efficiency and water availability on tolerance of leaf removal in *Amaranthus hybridus*[J]. Journal of Ecology, 2004, 92: 882-892.
- [12] 李金花, 李镇清. 多花黑麦草早期低刈割的超补偿效应试验[J]. 草业科学, 2005, 22(9): 39-40.
- [13] 王海洋, 杜国祯, 任青吉. 种群密度与施肥对垂穗披碱草刈割后补偿作用的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 67-74.
- [14] Du Z Y, Bramlage W J. Modified thiobarbituric acid assay for measuring lipid oxidation in sugar-rich plant tissue extracts[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 1992, 40: 1566-1570.
- [15] Bates L S, Waldren R P, Teare I K. Rapid determined of free proline for water stress studies[J]. Plant and Soil, 1973, 39: 205-208.
- [16] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 广州科技出版社, 2006. 21.
- [17] Field C, Mooney H A. The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants[A]. In: Givnish T J. On the Economy of Plant Form and Function[C]. Proceedings of the sixth Maria Moors Cabot Symposium, Cambridge University Press, 1986.

25-55.

- [18] Niinemets U, Portsmouth A, Truus L. Leaf structural and photosynthetic characteristics, and biomass allocation to foliage to relation to foliage content and tree in three *Betula* species[J]. *Annals of Botany*, 2002, 1989; 191-204.
- [19] 田灵芝, 董召荣, 沈洁, 等. 刈割—追氮对小黑麦抽穗后光合特性的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2004, 31(1): 72-75.
- [20] 夏景新, 常会宁, 李志坚. 羊茅黑麦草和无芒雀麦叶组织刈割对叶片枯萎的影响[J]. *中国草地*, 1996, 5: 17-22.
- [21] 孙国荣, 彭永臻, 阎秀峰. 干旱胁迫对白桦实生苗保护酶活性及膜质过氧化作用的影响[J]. *林业科学*, 2003, 39(1): 165-167.
- [22] 李伯林, 梅慧生. 燕麦叶片衰老与活性氧代谢的关系[J]. *植物生理学报*, 1989, 15(1): 6-12.
- [23] Robberecht R, Mahall B E, Nobel P S. Experimental removal of intraspecific competitors-effects on water relations and productivity of a desert bunchgrass, *Hilaria rigida*[J]. *Oecologia*, 1983, 60: 21-24.
- [24] 全先庆, 张渝洁, 单雷, 等. 脯氨酸在植物生长和非生物胁迫耐受中的作用[J]. *生物技术通讯*, 2007, (18): 159-163.
- [25] Holbrook N M, Putz F E. From epiphyte to tree: Differences in leaf structure and leaf water relation associated with the transition in growth form in eight species of hemiepiphytes[J]. *Plant Cell and Environment*, 1996, 19: 631-642.
- [26] Peltier J P, Marigo G. Drought adaptation in *Fraxinus excelsior* L.: Physiological basis of the elastic adjustment[J]. *Plant Physiology*, 1999, 154: 529-535.
- [27] Anjum F, Rishi V, Ahmad F. Compatibility of osmolytes with Gibbs energy of stabilization of routine[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2000, 1476: 75-84.
- [28] Matysik J, Alia B, Mohanty P. Molecular mechanisms of quenching of reactive oxygen species by proline under stress in plants[J]. *Current Science*, 2002, 82(5): 525-532.
- [29] Fang X, Li J, Xiong Y, *et al.* Responses of *Caragana korshinskii* Kom. to shoot removal: Mechanisms underlying regrowth[J]. *Ecological Research*, 2008, 23: 863-871.
- [30] 曲涛, 南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展[J]. *草业学报*, 2008, 17(2): 126-135.
- [31] Zhang J X, Kirkham M B. Drought-stress-induced changes in activities of superoxide dismutase, catalase, and peroxidase in wheat species[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1994, 35(5): 785-791.
- [32] 张远兵, 刘爱荣, 方蓉. 外源一氧化氮对镉胁迫下黑麦草生长和抗氧化酶活性的影响[J]. *草业学报*, 2008, 17(4): 57-64.

Changes and mechanism in response of photosynthetic rates of lucerne residue to cutting under different water treatments

HE Shu-bin, LIU Guo-li, YANG Hui-min

(Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Ministry of Agriculture; School of Pastoral
Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The changes in photosynthetic rate and its mechanism during lucerne (*Medicago sativa*) regrowth after cutting were investigated in a greenhouse experiment. Photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (g_s), contents of malondialdehyde (MDA) and proline, and the activities of superoxidase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) were measured at different soil water availabilities and cutting. P_n and g_s increased shortly after cutting. Leaf MDA content decreased 10 h after cutting, while proline content increased. In addition, activity of antioxidases, including SOD, POD and CAT, increased shortly after cutting. The same trend of changes was observed under both water treatments, but significant difference appeared between treatments. It is suggested that cutting stimuli may reduce water stress within the plant body, enhancing osmotic adjustment and clearance of oxygen species, promoting normal functions of plant organs like stomatal movement. Thus, enough CO_2 can be supplied and P_n is then maintained and even enhanced.

Key words: cutting; water stress; lucerne; photosynthesis; signaling mechanism