

DOI: 10.13292/j.1000-4890.201702.025

围封对元江稀树灌草丛林下植被物种组成 及生物量分配的影响

金艳强^{1,3} 李敬^{1,3} 刘运通¹ 张一平^{1*} 费学海^{1,3} 李培广² 张树斌²

(¹中国科学院西双版纳热带植物园, 热带森林生态学重点实验室, 云南勐仑 666303; ²中国科学院西双版纳热带植物园, 元江干热河谷生态站, 云南元江 653300; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 以元江干热河谷稀树灌草丛植被为对象, 通过设置围封与自由放牧两种处理, 对稀树灌草丛林下植被物种组成、多样性指数及生物量进行了研究, 以探明两种处理下稀树灌草丛林下植被群落结构的变化趋势及林下植被生物量的分配特点。结果表明: 围封显著增加了林下灌木和草本的高度、盖度和生物量($P<0.05$); 但降低了物种多样性指数。相比放牧样地, 围封对灌木地下/地上生物量之比的影响不明显($P>0.05$), 但围封显著提高了灌木的枝叶生物量比($P<0.05$); 同时, 围封还降低草本的地下/地上生物量比($P<0.05$), 这是植物通过改变自身的资源分配, 以应对干扰等不利环境对自身发育的影响, 是一种适应性机制。总之, 围封对植被的恢复是有效的, 但适当的干扰对维持生态系统稳定和群落演替是有利的。

关键词 物种多样性; 生物量; 干热河谷; 植被恢复

Effects of exclosure on species diversity and biomass allocation of understory vegetation of Savanna ecosystem in Yuanjiang dry-hot valley, Yunnan, Southwest China

JIN Yan-qiang^{1,3}, LI Jing^{1,3}, Liu Yun-tong¹, ZHANG Yi-ping^{1*}, FEI Xue-hai^{1,3}, LI Pei-guang², ZHANG Shu-bin² (¹Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China; ²Yuanjiang Savanna Ecosystem Research Station, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Yuanjiang 653300, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Effects of exclosures on species diversity and biomass allocation were studied in a savanna ecosystem in Yuanjiang dry-hot valley, Yunnan, Southwest China over two years. The response of understory vegetation to exclosure was compared with the free grazing area. We found that the average height, percentage cover and biomass of understory and its components increased significantly with exclosure compared to free grazing area. Herbaceous species diversity was significantly declined with exclosure. Compared to free grazing, the belowground/aboveground biomass ratio (B:A ratio) of shrubs under exclosure varied insignificantly, while the branch/leaf biomass ratio for shrubs increased. However, the B:A ratio of herbs was significantly decreased under exclosure treatments. This could be attributed to adaptation strategies in which plant changes in resource allocation pattern in response to adverse environmental conditions. In general,

国家自然科学基金与云南省联合项目(U1202234)、国家基金青年项目(41405143)、国家基金重大项目(31290221)和云南省基金面上项目(2015FB186)资助。

收稿日期: 2016-06-02 接受日期: 2016-11-22

*通讯作者 E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

the enclosure was an effective approach of vegetation restoration and subsequent biomass accumulation. However, appropriate competition and intermediate disturbance (e.g., grazing) can buffer species richness, which is helpful for maintaining the ecosystem stability and functions *per se*.

Key words: species diversity; biomass; dry-hot valley; vegetation restoration.

作为一种主要的植被恢复和重建措施,围封在植物区系和生物多样性保育、涵养水源、水土保持、提高土壤肥力、促进森林更新与演替、固碳增汇等方面发挥着重要作用(费世民等, 2004; 孙宗玖等, 2007; 闫玉春等, 2009)。围封已得到广泛的应用,尤其是在草地恢复及保护机制机理研究上较为深入(闫玉春等, 2009);当围封以林木为保护对象时,称之为封山育林,现有的研究更多集中于天然林和人工林保护(杨梅等, 2003)。

干热河谷由于其特殊的气候特点,其环境更为敏感、脆弱,再加上长期的放牧干扰,其主要的植被类型稀树灌草丛——萨王纳(savanna; 金振洲, 2002)的生长正遭受严重的威胁,实施相应的保护措施十分重要。但是,在干热河谷区以稀树灌草丛为围封对象的研究并不多见,仅有极少数的研究探讨了围封对土壤种子库和生态功能的影响(李贵祥等, 2007; 张建利等, 2008)。因而,开展围封下干热河谷稀树灌草丛植被相关的研究显得更为迫切。

群落结构与多样性作为度量群落功能复杂性的重要指标,是认识森林生态系统功能的基础。元江干热河谷稀树灌草丛是一种典型的河谷型萨王纳(金振洲, 1999),具有较好的代表性(云南植被编写组, 1987)。虽然针对元江稀树灌木草丛群落结构特征(金振洲, 1999; 刘方炎等, 2007; 沈蕊等, 2010)与多样性方面(李海涛等, 2008; 丰帮艳等, 2013)已有少量的研究,但大多数是基于现状的调查,未能充分考虑不同管理措施对植被的影响,针对稀树灌木草丛群落结构与多样性对围封的响应等研究还有待进一步深化。另外,森林生物量是衡量森林生态功能的关键指标,也是研究碳循环的基础。而针对元江干热河谷稀树灌草丛生物量的研究极少,尤其是围封下其生物量分配是如何响应的还不清楚。因此,本研究选择元江干热河谷稀树灌木草丛生态系统为对象,旨在研究围封对稀树灌木草丛群落结构与多样性、生物量的影响,为该区植被恢复与生物多样性保育提供科学基础。

1 研究区概况

研究区域位于云南省玉溪市元江县境内中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站(102°10'40" E, 23°27'56" N),海拔 481 m。该区植被以稀树灌草丛为代表,也被称为河谷型萨王纳植被,分布于元江河谷两侧的山坡上,乔木层主要优势种为厚皮树(*Lannea coromandelica*)、老人皮(*Polyalthia cerasoides*),灌木层中多以宿萼木(*Strophoblachia fimbrialyx*)、虾子花(*Woodfordia fruticosa*)、霸王鞭(*Euphorbia royleana*)等种类为主,草本层主要以扭黄茅(*Heteropogon contortus*)为优势(金振洲, 1999)。该区平均年降雨量在 700~800 mm,年平均温度 24.9 °C,年日照时数 2261.7 h,年蒸发量 2750 mm,总体气候特点为降水量少,平均温度高,日照充足,干湿季明显,终年无霜(张一平等, 2005)。土壤以燥红土为主。

2 研究方法

2.1 样方调查

2012年3月在研究区布设了3块围封样地,于2014年6月在围封样地外再选取3块自由放牧样地与围封样地形成对比,样地面积为600 m²(20 m×30 m),然后对6块样地分别进行了调查。对样地中乔木(幼树树高>3 m)进行每木检尺,测定每株的树高、胸径、冠幅。在样地中对角线上随机设置3个灌木样方,样方大小为2 m×2 m,然后分种测定灌木的物种组成、株丛数、平均基径、平均高度。另外,在样地内分别设置了3个草本样方(1 m×1 m),嵌套于灌木样方左上角,分种测定了草本株丛数、盖度及平均高度。最后,采用全收获法测定灌木、草本的生物量,灌木(叶、枝干、根)、草本(地上、地下)按不同部位分别进行采样,

称鲜重后每个部分取 150 g 左右的样品带回实验室，在烘箱中用 105 °C 杀青 30 min 后，恒温 70 °C 下烘干至平衡重后测定其含水率，进而换算成生物量。

2.2 数据处理

2.2.1 群落结构参数指标 重要值是综合衡量物种在群落中地位的有效指标，通过重要值可以得到种群的动态。林下植被中各物种的重要值(importance value, IV)采用以下的公式进行计算，即

$$IV=(\text{相对多度}+\text{相对高度}+\text{相对盖度})/3 \quad (1)$$

物种多样性选用丰富度(Margalef 指数)、优势度(Simpson 指数和 Shannon 指数)、均匀度(Pielou 指数)3 个方面来衡量。各指数分别计算为：

$$\text{Margalef 指数: } M = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

$$\text{Simpon 指数: } D = 1 - \sum_{i=1}^n P_i^2 \quad (3)$$

$$\text{Shannon 指数: } H = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (4)$$

$$\text{Pielou 指数: } J = H / \ln S \quad (5)$$

式中， S 指物种数， N 为所有种的个体总数， P_i 为第 i 种个体数占总个体数的比例。

2.2.2 生物量分配计算 资源分配可以用于反映植物对环境变化的一种响应。林下植被中灌木、草本生物量的分配通过地下部分地上部分比(ratio of belowground biomass to aboveground biomass, B:A ratio)、枝叶比(ratio of branch biomass to leaf biomass, B:L ratio)两个指标衡量，分别计算为：

$$B:A \text{ ratio} = W_b / W_a \quad (6)$$

$$B:L \text{ ratio} = W_s / W_l \quad (7)$$

式中， W_b 指代地下生物量， W_a 为地上生物量， W_s 为枝条生物量， W_l 为叶片生物量。

所有数据的统计分析均使用 R 软件(R Core Team, 2015)完成。围封与放牧样地间各指标的差异使用两个独立样本 t 检验进行分析。样地中各生物群体的物种多样性指数(Simpson 指数、Shannon 指数、Pielou 均匀度指数)通过 Vegan 数据包(Oksanen *et al.*, 2015)进行统计计算。

3 结果与分析

3.1 稀树灌木草丛群落结构

围封对林分各层次群落结构参数的影响差异较大(表 1)。从灌木的群落结构参数上，相比放牧干扰，围封处理显著提高了灌木盖度($P<0.001$)和高度($P<0.001$)。围封对草本层的影响更为明显，围封显著提高了草本盖度($P<0.001$)和草本均高($P=0.002$)。

表 1 围封对稀树灌木草丛群落结构的影响(均值±标准误)

Table 1 Effect of exclosure on community structure of savanna ecosystem (mean±SE)

处理	灌木盖度(%)	灌木均高(cm)	草本盖度(%)	草本均高(cm)
围封	39.1±2.6 a	70.6±9.1 a	90.8±4.1 a	49.0±8.8 a
放牧	21.2±3.7 b	47.5±9.4 b	52.2±6.0 b	10.1±1.7 b

不同 a, b 字母指代在 $P<0.05$ 水平下围封和放牧两种处理间差异显著。

围封对草本层的物种组成的影响也比较明显(表 2)。围封与放牧下群落中都以扭黄茅最

为优势，其重要值达 0.6 以上。具体来看，围封处理下扭黄茅的优势地位得到进一步提升，其重要值达到 0.90；相反，围封下独穗飘拂草(*Fimbristylis monostachya*)和蔓草虫豆(*Cajanus scarabaeoides*)所占的比重进一步减少，重要值降低。

表 2 不同处理下稀树灌草丛草本层优势种重要值

Table 2 Importance value of herbs for savanna ecosystem under the enclosure

生长型	物种	围封	放牧
禾草类	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	0.90	0.65
	独穗飘拂草 <i>Fimbristylis monostachya</i>	0.04	0.06
	细柄黍 <i>Panicum psilopodium</i>	0	0.13
	锋芒草 <i>Tragus racemosus</i>	0	0.07
非禾草类	蔓草虫豆 <i>Cajanus scarabaeoides</i>	0.07	0.21
	蛛丝毛蓝耳草 <i>Cyanotis arachnoidea</i>	0.05	0
	麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	0	0.08
	九叶木蓝 <i>Indigofera linnaei</i>	0	0.05

3.2 稀树灌木草丛群落林下植被物种多样性

通过对物种多样性进行分析发现，围封处理对灌木多样性的影响不明显($P>0.05$; 图 1)。然而，围封显著降低了草本层的物种多样性，其 Simpson 指数、Shannon 指数、Pielou 均匀度指数显著减小($P<0.05$; 图 1)；而 Margalef 丰富度指数在两种处理间的差异虽未能通过显著性检验($P=0.168$)，但从其数值上可看出围封下 Margalef 丰富度指数在减少。

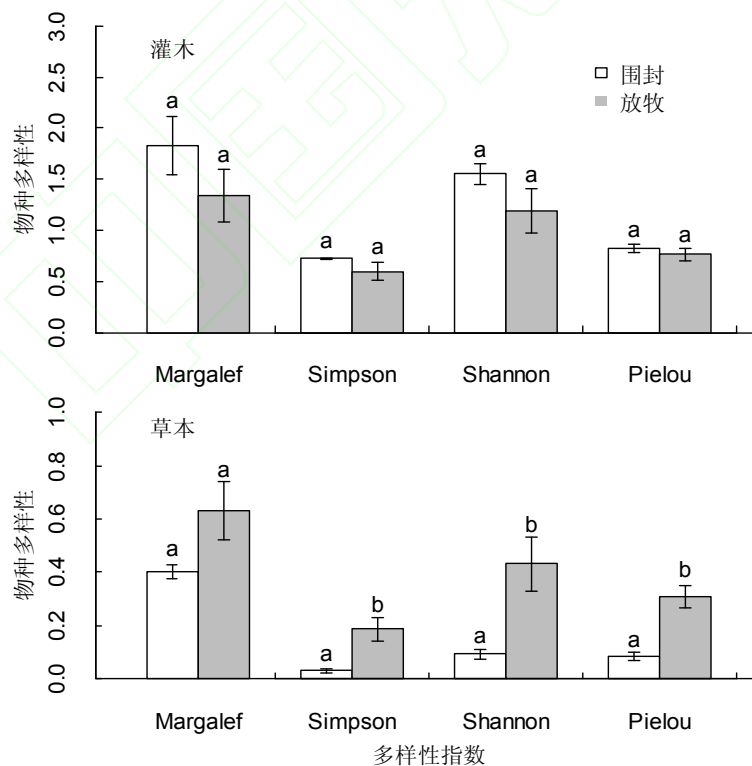


图 1 围封与放牧下稀树灌木草丛林下植被物种多样性的差异

Fig. 1 Difference of species diversity of understory in savanna ecosystem under the enclosure

不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平下围封和放牧两种处理间差异显著。

3.3 稀树灌木草丛林下植被生物量

稀树灌木草丛林下植被总生物量在围封(14.73 t hm^{-2})和放牧(7.02 t hm^{-2})两种处理下差异显著($P<0.001$), 围封下林下植被的生物量增加(表 3)。从灌木层上看, 围封处理与放牧处理间灌木总生物量($P=0.064$)、叶片($P=0.059$)、枝干($P=0.059$)、地上部分($P=0.059$)及地下部分($P=0.059$)生物量的差异虽未能通过显著性检验, 但从数值上看围封处理下灌木的生物量有所增大(表 3)。另外, 围封对草本层的影响更为明显, 围封下草本总的生物量(4.80 t hm^{-2})明显高于放牧处理(0.88 t hm^{-2})($P<0.001$), 其增幅达到 6 倍以上; 草本层各组分也呈现出相同的规律(表 3), 围封下草本地上部分生物量($P<0.001$)增加最为明显, 增幅达 7 倍左右, 而地下部分生物量($P<0.001$)的增幅也接近 4 倍左右。

表 3 围封与放牧下稀树灌木草丛林下植被生物量的差异(均值 \pm 标准误)

Table 3 Difference of understory biomass of savanna ecosystem under the enclosure (mean \pm SE)

	部位	围封($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	放牧($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
灌木	叶	2.70 \pm 0.52a	1.49 \pm 0.63a
	枝干	4.39 \pm 0.77a	2.31 \pm 0.99a
	地上	7.09 \pm 1.28a	3.81 \pm 1.62a
	地下	2.84 \pm 0.66a	2.43 \pm 1.14a
	总	9.93 \pm 1.83a	6.23 \pm 2.76a
草本 Herb	地上	3.91 \pm 0.52a	0.56 \pm 0.09b
	地下	0.90 \pm 0.10a	0.23 \pm 0.02b
	总	4.80 \pm 0.58a	0.79 \pm 0.11b
林下植被		14.73 \pm 2.05a	7.02 \pm 2.73b

不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平下围封和放牧两种处理间差异显著。

3.4 稀树灌木草丛林下植被生物量分配

稀树灌草丛灌木生物量的地下/地上比(B:A ratio)在围封和放牧两种处理下差异并不显著($P>0.05$; 图 2), 表明围封对灌木地下、地上生物量的分配不明显; 但从灌木的枝叶比(B:L ratio)上看, 相比放牧样地, 围封样地灌木的枝叶比显著提高($P=0.023$; 图 2), 增加的幅度超过 17%, 说明围封促使灌木生物量更多地分配在枝条上。

对于草本, 围封处理下稀树灌草丛生物量地下/地上比(0.25)要显著低于放牧干扰下生物量的地下/地上比(0.48, $P=0.022$), 表明围封促进了草本地地上部分生物量的积累。

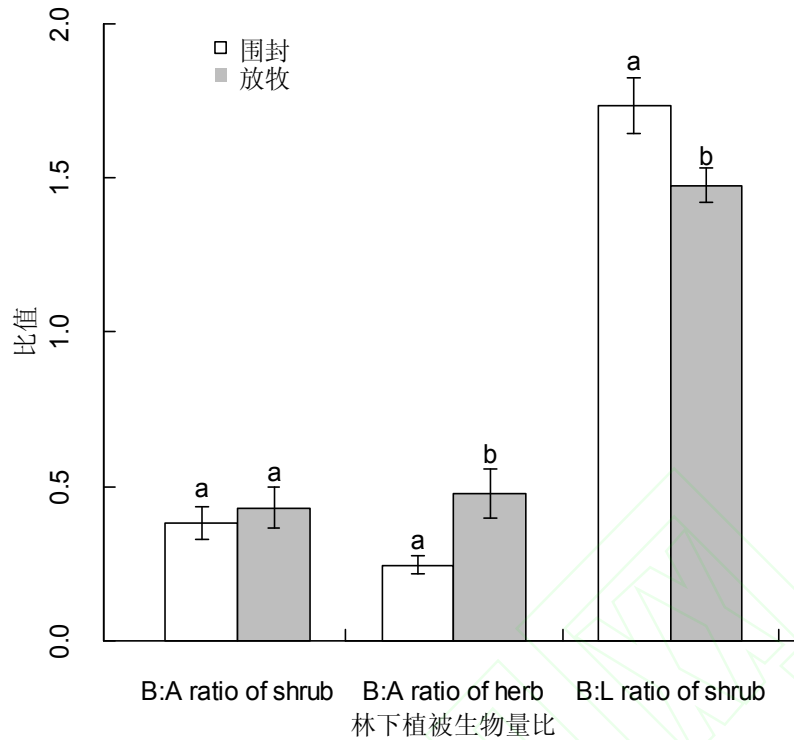


图2 围封与放牧下稀树灌木草丛林下植被生物量分配特征

Fig. 2 Characters of biomass allocation of understory in savanna under the enclosure

B:A ratio of shrub, 灌木地下生物量与地上生物量之比; B:A ratio of herb, 草本地下生物量与地上生物量之比; B:L ratio of shrub, 灌木枝与叶生物量比。不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下围封和放牧两种处理间差异显著。

4 结论与讨论

4.1 围封对群落结构及生物量的影响

围封作为一种简单有效的植被保育手段,直接影响着植物的生长状况和群落结构(闫玉春等, 2009)。植物的高度、盖度及生物量是衡量物种生长状况最为直接的指标。本研究发现,围封显著提高了干热河谷区稀树灌草丛林下植被的平均高度、盖度及生物量,尤其是草本层更为明显(表 1、表 3)。这与左万庆等(2009)、王万林等(2011)和 Bär Lamas 等(2013)的研究结果相似,说明围封是有利于增加物种高度、盖度及生物量的。物种组成是群落结构的重要特征,也是研究群落演替的基础,尤其是优势物种的变化是群落演替的重要标志。在本研究中,草本层优势种扭黄茅,相比对照(自由放牧)样地,围封下其优势地位得到进一步提升(重要值达 0.9, 表 2);而禾草类中主要伴生种(如独穗飘拂草、蔓草虫豆等)的优势地位反而进一步弱化。这主要是因为家畜等植食动物选择性的取食有关,植食性动物的取食导致了物种的盖度、高度、生物量及个体数等发生变化(Bråthen *et al.*, 2001; 孙涛等, 2007; Bär Lamas *et al.*, 2013; 赵婷婷等, 2014),进而影响其优势地位,群落中稀有种的地位也得到提升(Osem *et al.*, 2002)。表明围封大大降低了大部分大型植食性动物对植物的取食压力,进而促进了林下植被的生长。

物种的多样性是衡量群落稳定的重要指标。从物种多样性上看,围封下物种的丰富度、生态优势度及均匀度都在下降,即物种多样性在减少(图 1)。其结果与干旱区草地(于永奇等, 2015)、干热河谷区(孙涛等, 2007; 张建利等, 2008)及世界其他稀树灌草丛(Koerner *et al.*, 2014)围封所得的结论是相似的。这主要由于禾草类(如扭黄茅)作为群落的优势种,它也是家畜采食的主要种类,在自由放牧的干扰下,优势物种受取食压力的影响,其优势地位被弱化,

为其他物种的发展提供了更多的空间,非禾草所占的比例上升(李军保等, 2009; 左万庆等, 2009), 进而导致物种间的地位及群落的物种组成发生变化, 提高了物种多样性, 是有利于群落稳定的, 这也证实了适当的放牧干扰有利于植被物种多样性的保育(闫玉春等, 2009; 于永奇等, 2015)。

需要指出的是, 综合来看, 围封虽然明显提高了稀树灌草丛林下植被的生物量积累, 但是其提高的生物量大部分都是几个优势种所贡献的, 而且围封也进一步加剧了草本层往单优种群落发展(王万林等, 2011), 即降低了群落的物种多样性。从群落的稳定性出发, 这是不利于该区植被的保育及长期发展的。因而, 围封时间和强度的设定对维持群落稳定及群落发展演替起到关键性作用, 有待于进一步的研究来证实。

4.2 围封对稀树灌木草丛林下植被生物量分配的影响

资源分配是植物为了抵御不良环境或躲避干扰而将资源分配到不同部位上的一种积极的适应性策略, 可以看作是植物性状在对环境适应过程中的一种权衡(Poorter *et al.*, 2012)。本研究中, 围封与放牧间灌木的地下/地上生物量比的差异不显著, 即围封对灌木的地上、地下生物量分配影响不明显。然而, 围封对灌木生物量的影响主要是在枝和叶的生物量分配上, 围封显著提高了灌木生物量的枝叶比(图 2), 相反, 自由放牧下灌木的枝叶比更低, 即在放牧干扰下灌木将更多的生物量分配到叶子上。这个结论与任海彦等(2009)在内蒙针对草地开展的研究是一致的。叶片作为光合作用的场所, 植物正常生长及发育所需的能量均要来自于叶片的光合产物, 所以叶片的数量在一定程度上决定了植被的生长。同时, 叶片也是植食动物主要的采食器官, 在放牧干扰下, 叶片遭到大量的采食, 为了维持自身的正常生长及生存, 植物通过减小茎生物量分配, 而增加叶生物量的分配以提高叶片的数量(Papatheodorou *et al.*, 1993), 这是为应对放牧干扰而做出的一种补偿性机制。Barton(2016)认为, 植食动物的采食会限制植物生物量分配, 植物会减少枝生物量的分配, 这也为我们的推断提供了佐证。

从草本上看, 围封样地草本生物量的地下/地上比要远低于放牧下草本生物量的地下/地上比(图 2), 即在放牧干扰下, 草本植物将更多的生物量分配到地下根系统, 而减少地上部分生物量分配。由于植物性状在环境中具有较强的可塑性(Franks *et al.*, 2014), 放牧干扰下, 受到植食动物采食的压力, 草本植物有往矮小化发展的趋势(李西良等, 2014), 即植物的高度、叶面积、叶片数量等性状变小, 同时增加地下根系的发展(Larreguy *et al.*, 2014), 这是植物应对采食的一种适应性机制。另外, 由于植食动物(家畜等)的践踏, 尤其是长期的或高强度的放牧致使土壤板结, 土壤肥力下降(程杰等, 2007; Deng *et al.*, 2014; Raiesi *et al.*, 2014), 进而影响植物正常生长中养分的供应, 植物通过向地下根系统分配更多的生物量以增加根系数量, 以便根系在更深更广的范围中获取更多的养分, 这个原因也是不容忽视的。

5 结 论

围封明显增加了稀树灌草丛林下植被的高度、盖度及生物量, 但降低了物种的多样性。虽然林下的灌木和草本通过资源的分配策略减轻或缓解放牧引起的干扰, 但围封与放牧的干扰对整个群落演替发展的影响是不容忽视的。总之, 围封作为一种简单有效的植被恢复手段, 可以较好地维持植物的生长发育, 但在进行围封处理时, 应综合考虑群落的稳定性及恢复目的, 合理设定围封时间或干扰强度。

致 谢 感谢中国科学院西双版纳热带植物园干热河谷生态站和中心实验室的大力支持, 以及刀万有、封乾元、刀新明在实验中的协助。

参考文献

- 程 杰, 高亚军. 2007. 云雾山封育草地土壤养分变化特征. 草地学报, 15(3): 273-277.
费世民, 彭镇华, 周金星, 等. 2004. 我国封山育林研究进展. 世界林业研究, 17(5): 29-33.

- 丰帮艳, 王燕梅, 冯建孟. 2013. 元江流域种子植物区系组成的纬度分布格局. 楚雄师范学院学报, **28**(6): 69-77.
- 金振洲. 1999. 云南元江干热河谷半萨王纳植被的植物群落学研究. 广西植物, **19**(4): 289-302.
- 金振洲. 2002. 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 昆明: 云南科技出版社.
- 李贵祥, 孟广涛, 方向京, 等. 2007. 封禁措施对云南金沙江流域主要林分的生态功能影响. 水土保持学报, **21**(1): 88-91.
- 李海涛, 杜凡, 王娟. 2008. 云南省元江自然保护区种子植物区系研究. 热带亚热带植物学报, **16**(5): 446-451.
- 李军保, 马存平, 鲁为华, 等. 2009. 围栏封育对昭苏马场春秋草地地上植物量的影响. 草原与草坪, (2): 46-50, 56.
- 李西良, 侯向阳, 吴新宏, 等. 2014. 草甸草原羊草茎叶功能性状对长期过度放牧的可塑性响应. 植物生态学报, **38**(5): 440-451.
- 刘方炎, 朱华, 施济普, 等. 2007. 元江干热河谷植物群落特征及土壤肥力研究. 应用与环境生物学报, **13**(6): 782-787.
- 任海彦, 郑淑霞, 白永飞. 2009. 放牧对内蒙古锡林河流域草地群落植物茎叶生物量资源分配的影响. 植物生态学报, **33**(6): 1065-1074.
- 沈蕊, 张建利, 何彪, 等. 2010. 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析. 生态环境学报, **19**(12): 2821-2825.
- 孙涛, 毕玉芬, 赵小社, 等. 2007. 围栏封育下山地灌草丛草地植被植物多样性与生物量的研究. 云南农业大学学报, **22**(2): 246-250, 279.
- 孙宗玖, 安沙舟, 马金昌. 2007. 围栏封育对草原植被及多样性的影响. 干旱区研究, **24**(5): 669-674.
- 王万林, 李海, 安沙舟, 等. 2011. 不同年限围栏对昭苏退化春秋草地生物量影响的研究. 新疆农业科学, **48**(6): 1104-1109.
- 闫玉春, 唐海萍, 辛晓平, 等. 2009. 围封对草地的影响研究进展. 生态学报, **29**(9): 5039-5046.
- 杨梅, 林思祖, 曹子林, 等. 2003. 中国热带、亚热带地区封山育林研究进展. 北华大学学报: 自然科学版, **4**(4): 342-348.
- 于永奇, 张丽娟, 高凯. 2015. 围封与放牧对沙地植物功能群及多样性的影响. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, **30**(3): 240-244.
- 云南植被编写组. 1987. 云南植被. 北京: 科学出版社.
- 张建利, 王海宁, 毕玉芬, 等. 2008. 封育对干热河谷稀树灌草丛退化草地土壤种子库和植物多样性的影响. 草原与草坪, **28**(1): 6-12, 17.
- 张一平, 段泽新, 窦军霞. 2005. 岷江上游干暖河谷与元江干热河谷的气候特征比较研究. 长江流域资源与环境, **14**(1): 76-82.
- 赵婷婷, 赵念席, 高玉葆. 2014. 围封禁牧对小叶锦鸡儿灌丛化草原群落组成和结构的影响. 生态学报, **34**(15): 4280-4287.
- 左万庆, 王玉辉, 王凤玉, 等. 2009. 围栏封育措施对退化羊草草原植物群落特征影响研究. 草业学报, **18**(3): 12-19.
- Bär Lamas MI, Larreguy C, Carrera AL, et al. 2013. Changes in plant cover and functional traits induced by grazing in the arid Patagonian Monte. *Acta Oecologica*, **51**: 66-73.
- Barton KE. 2016. Low tolerance to simulated herbivory in Hawaiian seedlings despite induced changes in photosynthesis and biomass allocation. *Annals of Botany*, **117**: 1053-1062.
- Bråthen KA, Oksanen J. 2001. Reindeer reduce biomass of preferred plant species. *Journal of Vegetation Science*, **12**: 473-480.
- Deng L, Zhang ZN, Shanguan ZP. 2014. Long-term fencing effects on plant diversity and soil properties in China.

Soil and Tillage Research, **137**: 7-15.

- Franks** SJ, Weber JJ, Aitken SN. 2014. Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations. *Evolutionary Applications*, **7**: 123-139.
- Koerner** SE, Burkepile DE, Fynn RWS, *et al.* 2014. Plant community response to loss of large herbivores differs between North American and South African savanna grasslands. *Ecology*, **95**: 808-816.
- Larreguy** C, Carrera AL, Bertiller MB. 2014. Effects of long-term grazing disturbance on the belowground storage of organic carbon in the Patagonian Monte, Argentina. *Journal of Environmental Management*, **134**: 47-55.
- Oksanen** J, Blanchet FG, Kindt R, *et al.* 2015. vegan: Community Ecology Package. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Osem** Y, Perevolotsky A, Kigel J. 2002. Grazing effect on diversity of annual plant communities in a semi-arid rangeland: interactions with small-scale spatial and temporal variation in primary productivity. *Journal of Ecology*, **90**: 936-946.
- Papathodorou** EM, Pantis JD, Stamou GP. 1993. The effects of grazing on growth, spatial pattern and age structure of *Quercus coccifera*. *Acta Oecologica*, **14**: 589-602.
- Poorter** H, Niklas KJ, Reich PB, *et al.* 2012. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, **193**: 30-50.
- R Core Team**. 2015. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- Raiesi** F, Riahi M. 2014. The influence of grazing enclosure on soil C stocks and dynamics, and ecological indicators in upland arid and semi-arid rangelands. *Ecological Indicators*, **41**: 145-154.

作者简介 金艳强, 男, 1987年生, 博士研究生, 研究方向为植物生理生态学。E-mail: jinyq@live.com.

责任编辑 张敏