

DOI: 10.5846/stxb201507121473

万志强, 杨九艳, 谷蕊, 闫玉龙, 梁艳, 杨劼, 高清竹. 不同刈割频度对大针茅草原群落特征及土壤元素含量的影响. 生态学报, 2016, 36(17): - .
Wan Z Q, Yang J Y, Gu R, Yan Y L, Liang Y, Gao Q Z. Effects of different mowing frequency on the community characteristics and soil element contents in a *Stipa grandis* steppe ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - .

不同刈割频度对大针茅草原群落特征及土壤元素含量的影响

万志强^{1,2}, 杨九艳^{1,*}, 谷蕊^{1,2}, 闫玉龙^{1,2}, 梁艳², 杨劼¹, 高清竹²

1. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021

2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081

摘要:在草原生态系统中,土壤是植物生长发育最重要的基质,对植物群落动态有显著的影响。刈割是内蒙古典型草原区除放牧外最重要的利用方式。研究不同刈割频度对典型草原区群落特征和若干土壤性质的影响及土壤因子与群落特征的相关性,旨在得出对群落多样性最有利并最适宜生产利用的刈割频度。研究区设置在内蒙古锡林浩特市东部以大针茅建群的典型草原;在 2009—2013 年进行不同频度的刈割处理,共设置处理,一年两次刈割、一年一次一个、两年一次(割一年休一年)刈割、围封,在 2013 年 8 月采集测定土壤养分的样品。刈割对群落多样性影响显著,割一年休一年香农多样性指数、Pielou 均匀度指数、丰富度指数均高于其他刈割处理($P<0.05$);不同频度刈割下,一年两次刈割处理下土壤 20—30cm 和 30—40cm 的有机质含量显著高于其他处理($P<0.05$);不同频度刈割处理下土壤中的速效磷和速效氮的含量没有显著差异;一年两次处理的土壤全氮含量显著高于其他处理($P<0.05$)。Shannon-Wiener 多样性指数与有机质含量、全氮含量呈显著负相关;Pielou 均匀度指数与土壤元素间无显著相关关系;Richness 指数与有机质含量呈显著负相关,与全氮含量为极显著负相关关系。割一年休一年刈割处理下土壤元素含量呈现更好的状态,结合群落物种多样性及生产利用的角度,割一年休一年为最合理的刈割频度。

关键词:刈割频度;群落特征;土壤营养元素;大针茅草原

Effects of different mowing frequency on the community characteristics and soil element contents in a *Stipa grandis* steppe ecosystem

WANZhiqiang^{1,2}, YANG Jiuyan^{1,*}, GU Rui^{1,2}, YANYulong^{1,2}, LIANG Yan², GAO Qingzhu²

1 School of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

2 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory for Agro-Environment & Climate Change of Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

Abstract: In grassland ecosystems, soil is the most important substrate for plant growth and has a significant impact on Plant community dynamics. Mowing is the most important way to use steppes in Inner Mongolia, except for grazing. In the present study, the impact of different mowing frequencies on the community characteristics and soil properties, and the correlation between soil factors and community characteristics were studied. The aim was to determine the most efficient and suitable mowing system for enhanced productivity and community diversity. The study area is a typical steppe primarily based on *Stipa grandis*, located in the Maodeng pasture of eastern Xilinhaote City, Inner Mongolia, the mowing frequency were set four gradient (TAY: Twice a year; OAY: Once a year; OTY: Once two year; NM: No mowing). Different mowing treatments were conducted in 2009—2013, soil samples were collected and analyzed in August 2013. The results indicated

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2014ZD02);农业部项目“国家牧草现代产业技术体系”(CARS-35);国家科技支撑计划专题项目(2013BAC09B03-2)

收稿日期:2015-07-12; 修订日期:2016-01-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangji1122@163.com

that the mowing treatments significantly affected plant community diversity ($P < 0.05$). The Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index, and species richness index for the mowing once-in-two-years treatment were higher than those for the other treatments. The organic matter contents of 20—30 and 30—40 cm soil in the mowing twice-in-one-year treatment were significantly higher than those in other treatments ($P < 0.05$). There were no significant differences in the available nitrogen and phosphorus contents of soil between the different treatments. In addition, the soil total nitrogen in the mowing twice-in-one-year treatment was significantly higher than that in other treatments ($P < 0.05$). The correlation analysis showed the Shannon-Wiener diversity and species richness indices were significantly negatively correlated with organic matter and total nitrogen contents, where as the Pielou evenness index had no correlation with soil element content, Richness index was significantly negatively correlated with total nitrogen content and organic matter content. Fencing was significantly beneficial to soil nutrients, but not conducive to the growth of dominant species, plant community species diversity, and increasing the plant community density. Combining the results for species diversity and production, an annual mowing interval was the most efficient mowing method for the steppe ecosystem.

Key Words: mowing systems, community characteristics, soil element contents, *Stipa grandis*, steppe

近年来,随着草原上人为活动的日益增多,草地资源受到了前所未有的严重威胁。刈割是草原常见且非常关键的一种利用方式,是高产天然草原和人工草地的主要利用方式之一。刈割对草地生态系统的物质循环、能量流动和信息传递等方面都会产生一定的影响。

在草原生态系统中,土壤是群落中植物生长发育最重要的基质,是许多营养物质和营养元素的库,也是微生物分解动植物残体和物质循环的场所。作为植物生长发育的基质和重要的环境因子,土壤理化性质对植物群落动态有显著的影响^[1]。土壤有机质是衡量土壤理化性质的重要指标,对土壤质量改变有重要指示性。土壤有机质的积累和分解速度的改变会影响生态系统内碳、氮循环^[2],进而影响系统内其他养分元素的循环和含量。土壤中其它营养元素含量有着不同程度的植物群落依存特性^[3-4]。土壤有机质分解和土壤营养元素动态对不同植物种群的生活史、生物量分配以及植物组织的化学组成均存在显著的作用关系^[5-8]。土壤元素的积存和循环与植被演替和生态系统的群落生物多样性之间的反馈关系推动了不同植物的竞争替代和植物群落的演替。

割草利用方式下,植物地上部生物量由于刈割而仅有少部分以枯落物形式归还于土壤。李景信等研究发现羊草割草地营养元素的输出大于输入量,提出连年割草影响土壤养分动态平衡,土壤养分将趋于贫乏,是草地生产力下降的原因之一^[9]。由于刈割不当导致植被严重退化、表土大量流失和土壤退化的现象也屡有发生,且有愈来愈严重的趋势^[10-11],但对不同频度刈割下土壤元素对物种多样性的影响相关研究则不多^[12-14]。土壤的性质与植物群落组成结构和植物多样性有着密切的关系,并且多年来一直是生态学家研究的热点^[15-17],因此,对植物物种多样性及其与土壤环境因子的关系的研究,是群落生态学研究 and 生物多样性保护与管理的基础。明确不同刈割频度下土壤元素含量的改变及对群落生长的反馈对于在典型草原区合理的刈割频度的确定具有重要的意义,对于刈割导致的退化草原的恢复和草原生态系统的稳定具有重要的作用。

1 研究区概况

研究样地设置在内蒙古自治区锡林浩特市毛登牧场内。该区域海拔为 1101m,土壤类型为栗钙土。年平均气温为 -0.4°C ,积温约为 2412°C ,植物平均生长期约 150d。年均降水量约 350mm,集中于 6—9 月,占全年降水量的 80%左右;年蒸发量为 1600—1800mm,降水量的季节和年际变化非常大。该区建群种为大针茅 (*Stipa grandis*) 和羊草 (*Leymus chinensis*),优势种主要有知母 (*Anemarrhena asphodeloides*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*) 和黄囊苔草 (*Carex korshinskii*)。

2 研究方法

2.1 实验设置

实验样地从 2010 年 5 月开始围封,总面积为 110m×80m,其中共设置 4 个实验处理,每个处理间有 10m 隔离带(表 1):

表 1 样地设置

Table 1 Fact sheet of research plots

刈割频度 Mowing frequency	编号 Serial number	刈割时间 Mowing time	样地面积 Plot area
一年两次 Twice a year	TAY	2011 年、2012 年、2013 年的 6 月、8 月	20m×80m
一年一次 Once a year	OAY	2010 年、2011 年、2012 年、2013 年的 8 月底	20m×80m
割一年休一年 Once two year	OTY	2010 年、2012 年的 8 月底	20m×80m
围封 No mowing	NM	2010 年初开始——	20m×80m

2.2 群落特征的调查

2013 年 5 月、6 月、7 月、8 月对实验处理利用随机样方法进行群落特征的调查,样方面积为 1m×1m,每个处理内选择 5 个样方,生物量统计为 2013 年 8 月样方内所有物种生物量之和(其中,TAY 处理为 6 月和 8 月两次生物量累加)。

重要值(P_i)=(相对高度+相对密度+相对生物量)/3

Shannon-Wiener 指数 $(H') = -\sum P_i \ln P_i$

Pielou 均匀度指数 $(J_{sw}) = H' / \ln S$

丰富度指数 $= (S-1) \log N$

式中, S 表示单位面积物种数; N 表示出现的物种的个体数; P_i 表示物种 i 的重要值^[18]。

2.3 土壤性质的调查

2013 年 8 月采集土壤样品,风干后过筛,重铬酸钾容量法—稀释热法测定有机质,Kjeltec™ 8400 测定植物全氮,碱解扩散法测定速效氮,0.5MNaHCO 法测定速效磷^[19]。

2.4 数据分析

SPSS 19.0 做方差分析和相关性分析。

3 结果与分析

3.1 群落特征

从图 1a 中看出,刈割有助于群落密度的增加,在 5 月、7 月、8 月群落调查中,刈割处理的群落密度显著高于围封处理($P<0.05$),6 月不同处理群落密度出现不同程度降低,原因可能与当年的降水时间分布有关,6 月份降水量较少,较多的杂类草萎蔫或死亡,致使群落密度出现下降。从图 1b 看出,围封处理的群落生物量显著大于刈割处理($P<0.05$),割一年休一年的刈割处理在群落生物量上,仅小于围封处理,在 5 月、6 月、8 月显著大于另外两种刈割处理,这说明了高频刈割较低频次刈割会显著降低草场的产量。

3.2 物种多样性

表 2 得出,围封的 Shannon-Wiener 多样性指数高于刈割处理,但 Pielou 均匀度指数在处理间没有显著差异;生长季初期,围封处理下物种丰富度指数要显著低于刈割处理;在生长季末期,围封处理下物种丰富度显著高于刈割处理,这与围封和刈割处理下群落中物种的生长期有关。

3.3 土壤营养元素含量

不同刈割频度下的土壤有机质在 0—20cm 土层差异不显著,在 20—50cm,有机质在不同刈割频度间的差

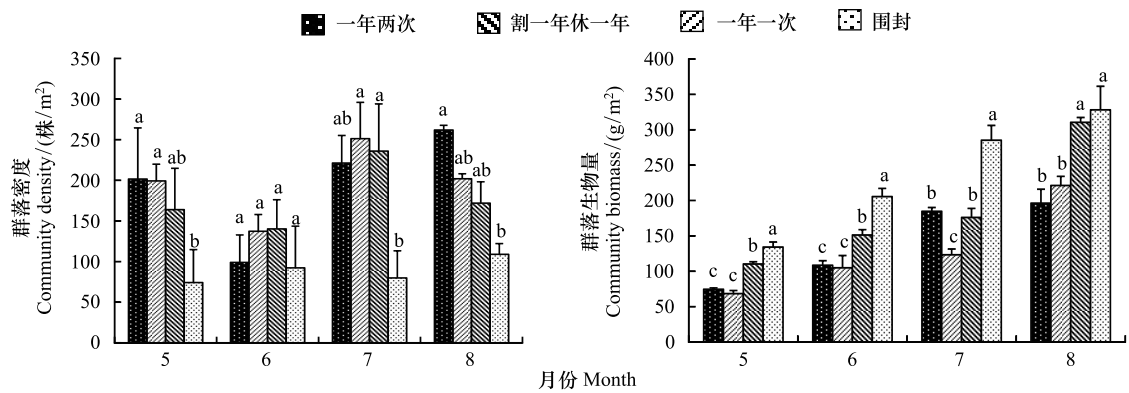


图1 不同频度刈割处理下群落地上生物量的季节变化

Fig1 Seasonal variation of the community density and aboveground biomass per unit area of the community to different cutting systems

TAY: 一年两次 Twice a year; OAY: 一年一次 Once a year; OTY: 割一年休一年 Once two year; NM: 围封 No mowing

异的趋势大致相同,高频次的刈割下,土壤中有有机质的含量要高于割一年休一年的处理以及围封处理。不同刈割频度下的土壤速效磷含量在不同土层表现出较小的差异,但差异不显著($P>0.05$)。

表 2 不同刈割频度下的多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数

Table 2 Shannon-Wiener、Pielou、Richness to different mowing frequency

时间 Month	多样性指数 Diversity Index	一年两次 TAY	一年一次 OAY	两年一次 OTY	围封 NM
6 月 June	Shannon-Wiener	1.41±0.15a	1.32±0.38b	1.44±0.07a	1.47±0.06a
	Pielou	0.79±0.14ab	0.82±0.19ab	0.94±0.11a	0.75±0.09ab
	Richness	15.97±1.68b	10.69±1.05c	24.29±0.57a	25.55±3.32a
7 月 July	Shannon-Wiener	1.42±0.22ab	1.29±0.22b	1.56±0.15ab	1.64±0.18a
	Pielou	0.86±0.16a	0.85±0.17a	0.92±0.10a	0.81±0.07a
	Richness	19.41±3.65a	14.20±1.65b	21.81±0.65a	15.80±1.78b
8 月 August	Shannon-Wiener	1.52±0.34ab	1.36±0.11b	1.78±0.22a	1.63±0.15a
	Pielou	0.8±0.18a	0.79±0.09ab	0.88±0.09a	0.81±0.07a
	Richness	20.5±3.62c	12.32±1.03d	24.26±0.33b	30.63±3.36a

不同处理间 Shannon-Wiener、Pielou、Richness 指数在同一时间显著性分析,字母不同表示差异显著($P < 0.05$); TAY: 一年两次 Twice a year; OAY: 一年一次 Once a year; OTY: 割一年休一年 Once two year; NM: 围封 No mowing

随着土壤深度的增加,土壤中的速效氮含量有明显的降低趋势;但是不同频度刈割处理在相同土层中的土壤速效氮的含量差异不显著($P>0.05$)。不论刈割处理还是围封处理,土壤中全氮的含量随着土壤深度的加深而降低,且降低的趋势较为明显。一年两次的刈割处理下,土壤中的全氮含量最高,而一年一次、割一年休一年以及围封处理显著的低于一年两次的刈割频度($P<0.05$)。

表 3 不同处理下不同土壤元素类型含量差异

Table 3 The content difference of different element types under different treatments

元素类型 Nutrient types	刈割频度 Mowing frequency	土层深度 Depth of soil				
		0—10cm	10—20cm	20—30cm	30—40cm	40—50cm
土壤有机质/% Soil organic matter	TAY	4.49±0.59a	3.76±1.10a	2.31±0.51b	2.34±0.32a	1.78±0.15a
	OAY	6.14±1.13a	3.70±0.31a	3.08±0.76a	1.92±0.12ab	1.82±0.60a
	OTY	3.91±0.47a	3.34±1.31a	1.54±0.76b	1.37±0.23b	1.23±0.71b
	NM	5.18±0.40a	4.96±2.26a	2.20±0.20b	1.97±0.40ab	1.61±0.76b
土壤全氮/(mg/kg) Soil total nitrogen	TAY	1732±35a	1394±45a	796±35a	725±70a	525±40a
	OAY	1389±35d	1136±60c	625±35d	483±78d	351±35d

续表						
元素类型 Nutrient types	刈割频度 Mowing frequency	土层深度 Depth of soil				
		0—10cm	10—20cm	20—30cm	30—40cm	40—50cm
土壤速效氮/ppm Soil available nitrogen	OTY	1412±35c	1159±70b	640±50c	489±35c	364±80b
	NM	1554±65b	1046±35d	736±80b	533±90b	359±35c
	TAY	68.31±9.8a	47.43±11.1a	32.49±9.0a	34.30±8.0a	23.28±3.0a
	OAY	72.16±13.4a	44.04±13.1a	26.66±4.7a	16.98±1.3b	20.83±2.7a
	OTY	48.24±2.0a	45.21±6.6a	37.80±13.8a	29.75±3.1ab	19.54±0.71a
土壤速效磷/ppm Soil available phosphorus	NM	57.23±9.9a	38.79±10.4a	25.61±5.0a	29.93±3.2ab	15.34±1.2a
	TAY	129±7.63a	151±19.93a	119±22.12a	126±18.35a	128±5.31a
	OAY	125±10.88a	147±19.65a	159±25.77a	136±14.14a	142±16.58a
	OTY	136±20.79a	126±17.52a	105±25.81a	147±26.18a	126±26.68a
	NM	131±13.68a	133±20.14a	166±23.32a	242±29.17a	130±32.27a

字母表示同一月份不同刈割频度间的土壤土壤微生物数量显著性分析;字母相同表示差异不显著 ($P>0.05$)

3.4 多样性指数与土壤因子相关性分析

群落密度与有机质含量呈显著正相关,而群落生物量与有机质含量和全氮含量均呈显著正相关。Shannon-Wiener 多样性指数与有机质含量、全氮含量呈显著性负相关;Pielou 均匀度指数与土壤因子间无显著相关关系;Richness 指数与有机质含量呈显著性负相关,与全氮含量为极显著负相关关系(表4)。

表 4 多样性指数与土壤因子相关性分析

Table 4 Correlation Analysis of Diversity indices with soil factors				
群落特征指数 Community Characteristics Index	有机质 Soil organic matter	全氮 Soil total nitrogen	速效氮 Soil available nitrogen	速效磷 Soil available phosphorus
密度 Density	0.58(*)	0.26	0.11	0.18
生物量 Biomass	0.76(* *)	0.77(* *)	-0.029	0.16
Shannon-Wiener	-0.42(*)	-0.61(*)	-0.07	0.15
Pielou	-0.19	-0.12	-0.02	0.17
Richness	-0.55(*)	-0.73(* *)	-0.10	0.19

“ * * ”表示 $P<0.01$,“ * ”表示 $P<0.05$ 达到显著性水平

4 讨论

刈割作为放牧的一种人为替代方式,能影响空间位较高的物种对于光的截留,改变固有植物对现有资源的生长反应,改变种间、种内竞争强度并进而修饰群落结构及物种组成等^[20-22]。从多样性角度上看,适度刈割可以增加物种多样性,实现有限资源的最大化利用^[23]。刈割提高了空间异质性并降低了物种间的竞争强度,适度的刈割有助于提高物种多样性和生产力,但不同程度的刈割对生产力与多样性产生的效应不同^[24-25]。因此,刈割可通过影响植物赖以生存的生境资源状况或直接影响植物本身生长,而分别对植物群落生产力与物种多样性产生不同的效应^[21,26-27]。较长时间不刈割、不放牧的草地,会积累较厚的枯落物,阻碍新种子与土壤接触,导致新种子无法萌发,致使一些植物种类不能及时更新繁衍,不利于草原的繁殖。围封不刈割只能在一定程度上维持群落的物种多样性;两年刈割一次处理使群落物种多样性先上升,由于刈割频率相对较低,优势种减少后又恢复,杂类草空间减少,最后多样性下降。本文研究实验处理时间较短,割一年休一年的物种多样性处于上升阶段,与围封处理下的物种多样性没有显著差异,但总体来讲刈割对于群落多样性指数和丰富度指数产生影响,多样性指数和丰富度指数均出现降低趋势,但对于 Pielou 均匀度指数没有显著影响。

土壤的有机质是调节土壤生物的生态动力的主要物质和能源,并且具有改善土壤结构和保持土壤水分的

性质,是土壤性质的重要指标^[28-30]。割草与放牧利用下,植物地上部生物量由于牲畜的采食及刈割而仅有少部分以枯落物形式归还于土壤。刈割会对群落的地上部分造成损害衰亡和退化,从而导致资源的流失并得不到很好的补充^[31]。从本研究结果来看,不同频度的刈割处理对于群落中0—20cm和40—50cm的土壤有机质没有显著影响($P>0.05$),在20—40cm,高频刈割处理下的有机质含量要高于割一年休两年和围封处理。Whittaker 等对热带雨林、温带草地等6类主要生态系统的分解过程进行了比较^[32],报道了世界温带草地的年分解指数为1.5,每年输入的枯枝落叶量达到95%,分解需要2a。王妮研究表明:东北羊草草原凋落物的分解指数为1.55,分解速率为 $0.44 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{a})$,95%凋落物分解需6.8a^[33]。凋落物的分解时间长于本实验刈割的周期,长期围封样地过厚的枯枝落叶覆被层阻碍绿色植物吸收养分和水分^[34],因此长期围封样地的凋落物不能快速降解对土壤中的有机质进行补充。

土壤中的速效养分可以更快速反映土壤对变化和干扰做出的响应。本实验研究结果显示,不同处理下土壤中速效磷的含量没有显著的差异($P>0.05$)。导致这种结果的主要原因是磷元素在土壤中缺乏较好的移动,土壤中的磷主要来自岩石漫长的时间和周期的分化因而土壤中的磷元素相对更稳定^[35]。氮是植物生存繁殖和生长发育所必需的大量矿质元素之一。氮是多种重要化合物的组成成分^[36]并参与植物本身DNA、RNA和蛋白质的合成^[37]。天然草地生态系统土壤中的氮元素主要来自群落中枯落物的分解。从本实验研究结果看出,不同频度刈割处理对于土壤中全氮含量的变化影响显著($P<0.05$),且均为一年两次刈割处理下土壤中全氮含量显著高于其他处理。柳剑丽认为土壤有机质及全量养分含量在物种组成与结构稳定的未退化群落最高,其次为处于恢复演替阶段的群落,而处于退化状态群落的土壤有机质及全量养分含量最低^[38]。这与本实验研究结果不同,可能原因是短周期的高频次的刈割在显著的降低土壤中养分含量之前,由于群落中空间结构的变化,使得群落地表的枯落物分解速度加快,对土壤中的全氮含量有一定的补充,但长时间的刈割周期过后,高频次的刈割处理下地表枯落物量显著减少,土壤中的养分得不到补充,进而土壤中养分的含量也会减少。

土壤养分与物种多样性的关系,存在不同看法。多数人认为,植物群落高的物种多样性出现在土壤养分梯度的中间位置^[39]。白永飞等对锡林河流域草原植物群落的研究以及李新荣等对沙坡头植物群落的研究表明,物种丰富度和多样性指数与土壤有机质及全氮含量呈正相关^[40-41];随着封育年限的不断增长,不同封育年限物种丰富度指数与多样性指数和土壤有机质含量有负相关关系,Pielou 均匀度指数和土壤有机质含量有正相关关系^[42]。有机质含量的多少与植物生长密切相关,但本文研究发现,多样性与丰富度指数均与有机质含量呈负相关关系,其原因可能是,群落多样性与丰富度对刈割的响应更为快速且敏感,而枯落物的分解速率要长于本实验的周期,因此,在围封样地,有机质并未得到有效的补充,导致多样性指数与有机质含量出现负相关关系。长时间的围封对于土壤养分有不利的影响,枯落物的累积导致降解速率的缓慢,都使得土壤中的养分物质得不到补充;但长时间高频次的刈割利用,会导致枯落物的减少,群落的退化,生态系统结构的不稳定和生态系统功能的弱化。

5 结论

刈割对群落多样性影响显著,割一年休一年 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、丰富度指数均高于其他刈割处理;不同频度刈割下,一年两次刈割处理下土壤20—30cm和30—40cm的有机质含量显著高于其他处理;不同频度刈割处理下土壤中的速效磷和速效氮的含量没有显著差异;一年两次处理的土壤全氮含量显著高于其他处理。Shannon-Wiener 多样性指数与有机质含量、全氮含量呈显著性负相关;Pielou 均匀度指数与土壤元素间无显著相关关系;Richness 指数与有机质含量呈显著性负相关,与全氮含量为极显著负相关关系。割一年休一年刈割处理下土壤元素含量呈现更好的状态,结合群落物种多样性及生产利用的角度,割一年休一年为最合理的刈割频度。

参考文献 (References):

- [1] Janssens F, Peeters A, Tallowin J R B, Bakker J P, Bekker R M, Fillat F, Oomes M J M. Relationship between soil chemical factors and grassland diversity. *Plant and Soil*, 1998, 202(1): 69-78.
- [2] Raupach M. Studies in the variation of soil reaction. II. Seasonal variations at Barooga, NSW. *Crop & Pasture Science*, 1951, 2(1): 73-82.
- [3] Trangmar B B, Yost R S, Wade M K, Uehara G, Sudjadi M. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(3): 668-674.
- [4] Vinton M A, Barke I C. Interactions between individual plant species and soil nutrient status in shortgrass steppe. *Ecology*, 1995, 76(4): 1116-1133.
- [5] Chen J, Stark J M. Plant species effects and carbon and nitrogen cycling in a sagebrush-crested wheatgrass soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(1): 47-57.
- [6] Melillo J M, Aber J D, Muratore J F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 1982, 63(3): 621-626.
- [7] Pastor J, Post W M. Influence of climate, soil moisture, and succession on forest carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry*, 1986, 2(1): 3-27.
- [8] Johnson L C, Damman A W H. Species-controlled sphagnum decay on a south Swedish raised bog. *Oikos*, 1991, 61(2): 234-242.
- [9] 李景信, 马义, 杨树安. 羊草及羊草割草地营养元素的动态研究. *植物研究*, 1990, 10(4): 107-112.
- [10] 史德明. 我国红壤区侵蚀土壤的退化及其防治. *中国水土保持*, 1987, (12): 4-7.
- [11] 赵其国. 我国红壤的退化问题. *土壤*, 1995, (6): 281-285.
- [12] Good J E G, Bryant R, Carlill P. Distribution, longevity and survival of upland hawthorn (*Crataegus monogyna*) scrub in North Wales in relation to sheep grazing. *Journal of Applied Ecology*, 1990, 27(1): 272-283.
- [13] Olff H, Bakker J P. Long-term dynamics of standing crop and species composition after the cessation of fertilizer application to mown grassland. *Journal of Applied Ecology*, 1991, 28(3): 1040-1052.
- [14] Pegtel D M, Bakker J P, Verweij G L, Fresco L F M. N, K and P deficiency in chronosequential cut summer-dry grasslands on gley podzol after the cessation of fertilizer application. *Plant and Soil*, 1995, 178(1): 121-131.
- [15] Goldberg D E, Miller T E. Effects of different resource additions of species diversity in an annual plant community. *Ecology*, 1990, 71(1): 213-225.
- [16] 安树青, 王峥峰, 朱学雷, 洪必恭, 赵儒林. 土壤因子对次生森林群落物种多样性的影响. *武汉植物研究*, 1997, 15(2): 143-150.
- [17] 杨万勤, 钟章成, 陶建平. 缙云山森林土壤速效 P 的分布特征及其与物种多样性的关系研究. *生态学杂志*, 2001, 20(4): 24-27.
- [18] 李博. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000: 89-101.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2008: 67-224.
- [20] 王璠, 张荣, 魏盼盼, 独占彪, 杜京旗, 孙国钧. 施肥和刈割对植物群落种间关系的影响. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(S1): 7-13.
- [21] Van Staalduinen M A, Dobarro I, Peco B. Interactive effects of clipping and nutrient availability on the compensatory growth of a grass species. *Plant Ecology*, 2010, 208(1): 55-64.
- [22] Bernhardt-Römermann M, Römermann C, Sperlich S, Schmidt W. Explaining grassland biomass-the contribution of climate, species and functional diversity depends on fertilization and mowing frequency. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(5): 1088-1097.
- [23] Tilman D, Lehman C L, Thomson K T. Plant diversity and ecosystem productivity: theoretical considerations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(5): 1857-1861.
- [24] Yamauchi A, Yamamura N. Herbivory promotes plant production and reproduction in nutrient-poor conditions: effects of plant adaptive phenology. *American Naturalist*, 2004, 163(1): 138-153.
- [25] Hooper D U, Chapin III F S, Ewel J J, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton J H, Lodge D M, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad A J, Vandermeer J, Wardle D A. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1): 3-35.
- [26] Kassen R, Buckling A, Bell G, Rainey P B. Diversity peaks at intermediate productivity in a laboratory microcosm. *Nature*, 2000, 406(6795): 508-512.
- [27] Rajaniemi T K. Why does fertilization reduce plant species diversity? Testing three competition-based hypotheses. *Journal of Ecology*, 2002, 90(2): 316-329.
- [28] 章家恩, 刘文高, 陈景青, 施耀才, 蔡燕飞. 刈割对牧草地下部根区土壤养分及土壤酶活性的影响. *生态环境*, 2005, 14(3): 387-391.
- [29] 李绍良, 贾树海, 陈有君, 康师安, 关世英, 何婕平. 内蒙古草原土壤退化进程及其评价指标的研究. *土壤通报*, 1997, 28(6): 241-243.

- [30] 李香真, 陈佐忠. 不同放牧率对草原植物与土壤 C、N、P 含量的影响. 草地学报, 1998, 6(2): 90-98.
- [31] 卢黎黎. 刈割对松嫩草地物种多样性—生产力关系及土壤特性的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [32] Whittaker R H. *Communities and Ecosystems*. New York: MacMillan, 1975.
- [33] 王妮, 郭继勋, 张保田. 东北松嫩草地羊草群落环境因素与凋落物分解季节动态. 草业学报, 2003, 12(1): 47-52.
- [34] 刘美玲, 宝音陶格涛, 杨持, 张新时. 不同轮割制度对内蒙古大针茅草原群落组成的影响. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 43(1): 83-87.
- [35] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 张志钧, 李忠文. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [36] 何小琴. 六盘山林区植被恢复过程中物种多样性及其土壤肥力的演变[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.
- [37] 黄友庭, 邢旗. 内蒙古牧草营养成分. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2000: 3-8.
- [38] 郑云玲. 封育对典型草原牧草及土壤养分的恢复效应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.
- [39] Gentry A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1988, 75(1): 1-34.
- [40] 白永飞, 李凌浩, 王其兵, 张丽霞, 张焱, 陈佐忠. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究. 植物生态学报, 2000, 24(6): 667-673.
- [41] 李新荣, 张景光, 刘立超, 陈怀顺, 石庆辉. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. 植物生态学报, 2000, 24(3): 257-261.
- [42] 赵菲, 谢应忠, 马红彬, 沈艳. 封育对典型草原植物群落物种多样性及土壤有机质的影响. 草业科学, 2011, 28(6): 887-891.