



放牧对荒漠草原克氏针茅种群和土壤生态化学计量特征的影响

杨 林, 马秀枝*, 李依倩

(内蒙古农业大学 林学院, 呼和浩特 010019)

摘要: 该研究选取内蒙古荒漠草原, 设计无牧区(NG)、中度放牧(MG)、重度放牧(HG)3个处理, 测定分析不同放牧强度处理5年后, 优势植物克氏针茅以及土壤的C、N、P营养元素的化学计量特征及其协同关系, 以揭示放牧生态系统养分循环的影响机制, 为区域草地的利用以及修复提供理论依据。结果表明:(1)轻度放牧下荒漠草原的物种多样性均显著高于中度和重度放牧条件($P < 0.05$)。(2)土壤中C、N含量以及C:N、N:P、C:P, 均随着放牧强度的增加呈先升高后降低的变化趋势, 土壤P含量随放牧强度的增加而升高。(3)随放牧强度增加, 克氏针茅地上部分C含量降低, N、P含量以及N:P先升高后降低, C:P则先减少后升高; 克氏针茅地下部分的C、N含量以及N:P一直呈增加的趋势, P含量先减少后升高, 而C:N、C:P则是与P含量规律相反。(4)与地上部分各元素含量相比, 克氏针茅地下部分各元素含量及其比值与土壤中各元素含量的相关性更高, 说明放牧条件下荒漠草原优势植物的根系与其所处的土壤环境具有一定的协同变化能力。

关键词: 荒漠草原; 放牧; 生态化学计量; 克氏针茅; 土壤

中图分类号: Q948.113

文献标志码: A

Effects of Grazing on Ecological Stoichiometry of *Stipa krylovii* and Soil in Desert Grassland

YANG Lin, MA Xiuzhi*, LI Yiqian

(College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China)

Abstract: This study selected desert grasslands in Inner Mongolia, and designed three treatments: no grazing (NG), moderate grazing (MG), and heavy grazing (HG). The stoichiometric characteristics and synergistic relationship of nutrient elements C, N and P of dominant plant *S. krylovii* and soil were analyzed after five years, to reveal the mechanism of nutrient cycling in grazing ecosystem and provide theoretical basis for the utilization and restoration of regional grassland. The results showed that: (1) the species diversity of desert grassland was significantly higher than that of moderate and heavy grazing ($P < 0.05$). (2) The contents of C, N, C:N, N:P, C:P in the soil all showed a trend of increasing firstly and then decreasing with the increase of grazing intensity, while the content of P in the soil increased with the increase of grazing intensity. (3) With the increase of grazing intensity, the contents of C in the aboveground part of *S. krylovii* decreased, and N, P, N:P increased firstly and then decreased, while C:P decreased firstly and then increased. The contents of C, N, N:P in the underground part of *S. krylovii* have been increasing. P content firstly decreased and then increased, while C:N, C:P were contrary to the rule of P content. (4) Compared with the contents of elements in the aboveground part, the cor-

收稿日期: 2019-10-14; 修改稿收到日期: 2020-02-25

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)子课题(XDA20050103)

作者简介: 杨林(1994—), 女, 在读硕士研究生。E-mail: 751222061@qq.com

*通信作者: 马秀枝, 教授, 主要从事生态系统碳氮循环以及温室气体研究。E-mail: luckmxy@imaau.edu.cn

relation between the content and ratio in the underground part of *S. krylovii* and the contents of elements in the soil is higher, which indicates that the root system of dominant plants in the desert grassland and its soil environment have certain cooperative change ability under grazing conditions.

Key words: desert grassland; grazing; ecological stoichiometry; *Stipa krylovii*; soil

草地是世界上分布最广泛的土地利用类型之一,是构成中国陆地这一生态系统的主要要素^[1]。世界草地面积约为 $3.30 \times 10^9 \text{ hm}^2$,占陆地面积的五分之一^[2]。草地是一种可更新资源^[3],是畜牧业发展最基本的生产资料。放牧是人类对草地资源利用的一种形式,它能够在很大程度上影响草地的生产能力以及物种的多样性^[4-7],同时还对生态系统以及养分的利用与循环产生很大的影响。C、N、P是植物生长中较为重要的元素,它们在能量的传递以及信息的表达上起到关键性的作用。同时,这3种元素在自然界中含量也是最多的,并且也是植物各种生理生化过程的底物与能量来源。氮素是植物极为重要的营养元素之一^[8],是高纬度或高海拔等陆地生态系统的主要限制性元素^[9],P含量虽然只占到植物干重的0.1%~0.5%,但它是植物生长过程中较为重要的元素^[10],不仅是植物体内化合物的重要组成部分而且能够参与植物体内的代谢过程^[11-12]。

有关放牧对植物和土壤养分特征的影响研究较多,由于在研究的过程中受到土壤类型、土壤植物以及放牧过程中的强度和时间等因素的差异性影响,目前的研究结果不尽相同。李香真等^[13]通过放牧率和土壤中的养分进行了分析比较,发现轻牧以及中牧基本上不会对土壤中的养分产生影响,但是重牧对土壤中有机质和全氮的含量影响较大。张艳博等^[14]发现,放牧能够加快凋谢物的分解,但是,不同的凋谢物分解的速率不同,同时不同凋谢物中不同的元素分解的速率也具有很大的差别。Frank^[15]通过对黄石公园土壤中的C、N元素的研究发现,放牧可以增加土壤中有机物的含量,并且无论是轻牧、中牧、重牧对有机物含量的影响基本上很小。而且研究发现,中度放牧条件下有利于维持草原的物种多样性^[16]。中度放牧条件下土壤N含量最小,而土壤P却在中度放牧强度下最大^[17]。另外有些研究也表明放牧能够增加土壤中N的含量,这是因为凋谢物分解后N和P元素的含量会增加,从而能够说明放牧能够增加元素之间的循环流动^[18]。目前,对于不同放牧强度下的C、N、P的计量关系的研究仅限于高寒草原和草甸草原,对于荒漠草原的研究有限,而且已有的研究中很少有将植物和土壤联系在一起,研究其营养元素的化学计

量变化特征。基于上述研究,本研究选择内蒙古荒漠草原,同时考虑优势植物克氏针茅以及土壤的C、N、P营养元素及其比的协同变化关系,以期进一步揭示放牧生态系统养分循环的影响机制,能够为区域的草地利用以及修复提供重要理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区包头市达茂旗希拉穆仁镇南500 m,样地坐标为 $41^{\circ}15'7''\text{N}, 111^{\circ}13'14''\text{E}$,海拔1 710 m。属于典型中温带半干旱大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季炎热,冬季干燥寒冷,昼夜温差大, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 $2\ 200\sim 2\ 500\ ^{\circ}\text{C}$,年均降雨量280 mm,湿润度 $0.15\sim 0.3$,降水量主要集中在7~9月,月平均温度最高月为6、7、8三个月,年均气温 $21.5\ ^{\circ}\text{C}$ 、 $24.0\ ^{\circ}\text{C}$ 、 $23.5\ ^{\circ}\text{C}$;无霜期175 d。土壤为栗钙土,土壤中的有机物含量、全氮含量分别为1.3%和0.13%。

试验地植被草层低矮,一般为8 cm,且植被较稀疏,盖度为17%~20%,种类组成较贫乏,植物群落由20多种植物组成。试验区主要植物种有冷蒿(*Artemisia frigida*)和无芒隐子草(*Cleistogenes songoricica*),主要伴生种有沙生冰草(*Agropyron desertorum*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)和羊草(*Leymus chinense*)等,无牧试验区优势植物种有克氏针茅(*Stipa krylovii*)。

1.2 试验设计

该样地试验区建立于2014年春,为牛羊混合放牧区。试验共设无牧区(no grazing, NG)、中度放牧(moderate grazing, MG)、重度放牧(heavy grazing, HG)3个处理,每处理3次重复,共9个小区。每个单牧小区面积为 1.32 hm^2 ,混合放牧小区的面积为 2.64 hm^2 ,载畜率为羊 $0.94\text{ 只} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。放牧强度为中度放牧区放15只羊,重度放牧区放15只羊和3头牛。放牧时间为每年6~9月份,每月7~13日进行连续放牧7 d。

1.3 样品的采集、测试

1.3.1 植物样品的采集、测试 于2018年8月在上述小区内对植被进行调查和取样。每个小区内沿

对角线设置3个1 m×1 m的草本样方,记录样方内所有植被的高度、盖度、多度、密度等,并齐地面剪取地上部分,装袋后称取鲜重。并在样方附近采集优势物种,采挖克氏针茅时,尽量减少对根系造成机械损伤。将完整的同种植物混合称取鲜重,进行记录编号,放入牛皮纸信封袋中保存。将带回的植物样品进行了一系列的处理,处理过程包括:用清水将叶片清洗干净并且去除根系中的土壤,将清洗干净的植物的根、叶片进行分离并且放入牛皮袋子中进行保存。置于65℃的烘箱中,烘干7~8 h至恒重,称取其干重,后放入粉碎机中粉碎,装袋以备检测。植物碳氮含量使用元素分析仪(VARIO ELIII, Elementar Analysensysteme GmbH)测定,植物磷含量采用紫外/可见光分光光度计(UV2300,上海)测定。

1.3.2 土壤样品的采集、测试 土壤样品采集地点在植被采集样方附近。在不同放牧强度小区中,用土钻采集土壤表层0~10 cm和10~20 cm的土样,每5钻混合为一个样品,3个重复,放入自封袋中带回实验室。取回的土样在室内进行处理,先过2 mm筛,剔除大的石块和动植物残体,利用四分法将土样取出,自然风干处理,后进行一些常规分析。用重铬酸钾-浓硫酸外加热法对土壤中的有机碳进行测量,对土壤中N含量的测量采用半微量凯氏法;土壤全磷的测定采用NaOH碱熔-钼锑抗比色法。

1.3.3 植物多样性的计算 在每个放牧试验区,选做3个固定样方,采用Simpson、Shannon-Weiner、Margalef和Pielou等4个指标的优势度、多样性、丰富度及均匀度指数进行了计算,具体的计算公式如下所示:

在每个放牧强度试验区,测定及计算方式同上:

$$\text{Shannon-Weiner 指数} = -\sum P_i \ln P_i \quad (1)$$

$$\text{Simpson 优势度指数} = 1 - \sum P_i^2 \quad (2)$$

$$\text{Margalef 丰富度指数} = \frac{S-1}{\ln N} \quad (3)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} = -\frac{\sum P_i \ln P_i}{\ln S} \quad (4)$$

式中:S、N、P_i分别代表了样方中的物种数、物种的个数以及第*i*种的密度占总密度的比例。

1.4 数据分析方法

植物、土壤碳氮比(C:N),碳磷比(C:P)和氮磷比(N:P)均采用质量比。用Excel 2010对数据进行初步整理及分析。正态分布检验用SPSS17.0,对不符合正态分布的数据进行标准化后,通过单因素方差分析和最小显著差数法进一步进行了统计分析,在各个指标相关度的分析中采用了皮尔逊(Pearson)相关系数进行分析,并用Origin 9.0和Excel 2010软件处理。图表数据均以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度对荒漠草原植物多样性的影响

通过表1我们可以看到放牧强度对荒漠草原植物的多样性指数、丰富度指数、优势度指数均有着显著的影响,但对物种均匀度指数的影响不显著。无放牧条件下的物种丰富度指数、优势度指数均显著高于中牧和重牧强度;物种多样性指数在无牧情况下最高,中牧次之,重牧最低;物种均匀度指数在不同放牧强度下无显著差异。

2.2 放牧强度对植物、土壤C、N、P含量及其化学计量特征的影响

由图1,A~C可以看出,放牧强度对克氏针茅和土壤中的C、N、P含量具有不同程度的影响。但随着放牧强度增强,克氏针茅植物地上部分(叶片)C含量下降,且不同放牧强度下差异显著(*P*<0.05);植物地下部分(根)C含量在增加,但不具有明显差异。中度放牧强度下的土壤N含量与无牧、

表1 不同放牧强度下荒漠草原物种多样性、优势度、均匀度和丰富度指数

Table 1 Species diversity, dominance, evenness and richness indexes of desert grasslands under different grazing intensities

放牧梯度 Grazing intensity	多样性指数 Index of diversity			
	Margalef	Shannon-Weiner	Simpson	Pielou
NG	2.08a ± 0.10	2.09a ± 0.04	0.85a ± 0.01	0.86a ± 0.01
MG	1.70b ± 0.11	1.80b ± 0.07	0.79b ± 0.02	0.82a ± 0.03
HG	1.83b ± 0.11	1.79b ± 0.08	0.77b ± 0.02	0.80a ± 0.02

注:NG. 无牧区;MG. 中度放牧;HG. 重度放牧。同一列数据后不同小写字母表示差异性显著(*P*<0.05)。下同

Note: NG. No grazing; MG. Moderate grazing; HG. Heavy grazing. Different small letters after the data in the same column mean significant difference (*P*<0.05). The same as below

重度放牧条件下的 N 含量相比差异显著 ($P < 0.05$) ; 不同放牧强度下克氏针茅地上部分 N 含量存在显著差异 ($P < 0.05$), 其中由高到低依次为 MG > HG > NG, 克氏针茅地下部分 N 含量随着放牧强度的增加而升高。随着放牧强度的增加, 土壤中 P 含量呈弱增长趋势, 与无牧、中度放牧强度相比, 重度放牧条件下显著较低; 相较于无牧和中度放牧, 克氏针茅地下部分的 P 含量在重度放牧强度下最高, 差异显著 ($P < 0.05$), 在中度放牧强度下最低, 但与无牧下相比差异不显著。

由于植物、土壤的 C、N、P 含量的不同, 因此表现出的化学计量特征也有所不同。如图 1, D ~ F 所示, 放牧强度的增加, 对土壤中 C:N 无显著影响; 无牧下的克氏针茅地上部分的 C:N 值显著高于中度和重度放牧强度; 而克氏针茅地下部分的 C:N 比无明显变化。N:P 含量受到放牧强度的

影响, 从总体上来看呈现出先增加后降低的趋势; 重牧条件下, 克氏针茅地下部分、土壤的 N:P 比与无牧、中牧条件下的 N:P 比具有显著差异; 克氏针茅的地上部分的 N:P 在不同放牧梯度下无显著差异。土壤中的 C:P 值变化较小, 但中度放牧条件下的 C:P 与无牧、重牧条件下的 C:P 具有显著差异; 无放牧下, 克氏针茅地上部分的 C:P 显著高于中度、重度下; 克氏针茅地下部分的 C:P 在中度放牧程度下显著高于其他两种放牧强度, 其次是重度放牧程度, 无放牧条件下的 C:P 最低。

2.3 优势植物与土壤 C、N、P 含量及生态化学计量之间的关系

由表 2 可知克氏针茅地下部分 C、P 含量与其地上部分 C、N、P 含量及其化学计量比之间关系不显著。克氏针茅地上部分的 C:P 比与克氏针茅地下部分的 N:P 比呈极显著的负相关关系; 植物地

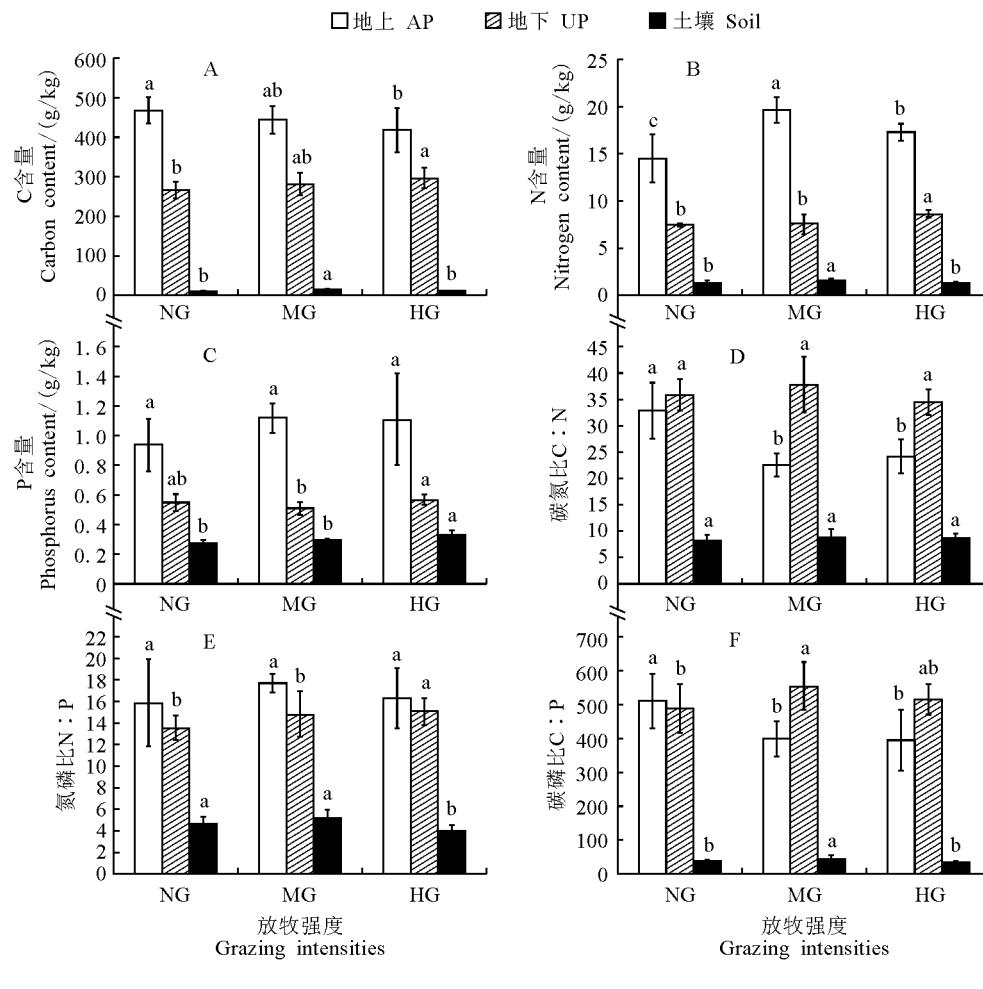


图 1 不同放牧强度下克氏针茅地上、地下部分及土壤 C、N、P 含量及其比值

Different normal letters mean significant difference at 0.05 level under different grazing intensities

Fig. 1 Contents and ratios of C, N and P in the aboveground and underground parts of *Stipa krylovii* and soil under different grazing intensities

下部分的 N : P 比与植物地上部分的 P 含量呈显著相关, 而与植物地上部分的 N 含量不相关, 说明研究区内克氏针茅种群地下部分的 N : P 值主要受到植物地上部分 P 含量的影响。

通过分析研究区内克氏针茅种群本身的 C、N、P 含量与土壤 C、N、P 及 C : N、C : P、N : P 比的相关性不同, 结果如表 2、表 3 所示。植物的地上部分 C 含量与土壤的 P 含量有显著的相关关系 ($P < 0.05$); 植物的地上部分 C : N 比与土壤的 P 含量具有极显著的相关关系 ($P < 0.01$)。植物的地下部分 C 含量与土壤 C : N 比有显著相关关系 ($P < 0.05$), 说明土壤中的 C 含量主要来源于植物的地下部分; 植物的地下部分 N 含量与土壤 P 含量有显著相关关系 ($P < 0.05$); 植物的地下部分 P 含量与土壤 N、N : P、C : P 有显著的负相关关系 ($P < 0.05$), 而与克氏针茅地上部分的 N : P、C : P 无相关关系, 说明克氏针茅种群的地下部分 N : P、C : P 主要受土壤调控, 和克氏针茅地上部分相关性不大; 植物地下部分的 C : N 比与土壤的 C 呈显著的相关关系 ($P < 0.05$), 与土壤的 C : N、C : P 有极显著的正相关关系

($P < 0.01$); 植物地下部分 N : P 与土壤 N 含量有显著相关关系 ($P < 0.05$), 与地上部分无关, 说明植物地下部分的 N 主要来源于土壤 N 的供给; 植物地下部分 C : P 与土壤 N 含量、C : N 比有显著正相关 ($P < 0.05$), 与土壤 C 含量、C : P 比有极显著的正相关关系 ($P < 0.01$)。

3 讨论与结论

3.1 放牧对荒漠草原克氏针茅营养元素含量及其化学计量值的影响

C、N 是构成植物生长过程中的基本元素, C : N 的比例反映了 N 的利用率以及固 C 能力的高低^[19]。因此 C、N 的含量在很大程度上反映了植物新陈代谢的能力, 对同一种植物来说不受环境、发育时间的影响时, 其元素的含量基本上较为稳定, 但是, 功能性和贮藏性物质含量受到外界环境以及生长发育的影响较大^[20-21]。本研究中, 克氏针茅种群 N、P 含量都略低于我国植物 N($18.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、P ($1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量的平均值^[22], 这证明了植物中养分的含量受到外界环境的影响, 植物在不同的环境下可以做出相应的调整来适应环境的变化以及自

表 2 荒漠草原克氏针茅地上部分 C、N、P 含量与地下部分 C、N、P 含量相关性

Table 2 Correlation of C, N and P contents in aboveground part and C, N and P contents in underground part of *S. krylovii* in desert grazing

地下 Underground part	地上 Aboveground part					
	C	N	P	C : N	N : P	C : P
C	-0.01	0.22	0.00	-0.20	0.20	0.00
N	-0.31	0.14	0.28	-0.29	-0.11	-0.36*
P	0.29	-0.08	-0.09	0.14	0.04	0.18
C : N	0.29	0.09	-0.26	0.07	0.31*	0.34*
N : P	-0.53**	0.21	0.34*	-0.39*	-0.14	-0.49**
C : P	-0.21	0.23	0.06	-0.25	0.13	-0.12

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平下相关性显著。下同

Note: * and ** represent significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as below

表 3 荒漠草原克氏针茅地上部分、地下部分 C、N、P 与土壤 C、N、P 的相关性

Table 3 Correlation between C, N, P in above and below ground parts of *Stipa krylovii* and soil C, N, P in desert grazing

	克氏针茅地上部分 Aboveground part of <i>S. krylovii</i>						克氏针茅地下部分 Underground part of <i>S. krylovii</i>					
	C	N	P	C : N	N : P	C : P	C	N	P	C : N	N : P	C : P
土壤 Soil	C	0.00	0.31	-0.08	-0.25	0.28	0.01	0.43	0.01	-0.27	0.44*	0.24
	N	0.00	0.17	-0.02	-0.06	0.13	0.00	0.08	-0.01	-0.38*	0.10	0.31*
	P	-0.37*	0.28	0.02	-0.43**	0.19	-0.26	0.17	0.41*	0.23	-0.25	0.20
	C : N	0.02	0.24	-0.07	-0.26	0.23	0.00	0.44*	0.00	0.01	0.47**	-0.01
	N : P	0.20	-0.04	-0.04	0.20	-0.01	0.15	-0.05	-0.23	-0.41*	0.19	0.12
	C : P	0.17	0.15	-0.09	-0.04	0.18	0.13	0.30	-0.17	-0.33*	0.50**	0.11

身养分含量计量比的变化。再者,克氏针茅种群地上部分中全N含量由高到低依次为 MG>HG>NG,说明中度放牧有利于地上部分对N的吸收,中等程度的干扰有利于克氏针茅保持生长活力,从而增加对N元素的吸收。植物的C:N、C:P不仅体现着植物对C的同化能力,也体现着植物对养分的利用效率,该试验中植物的C:N、C:P的平均值都高于全球植物水平的平均值^[23],在无牧条件下的克氏针茅地上部分的C:N高于中度和重度的放牧强度的克氏针茅地上部分的C:N,说明无放牧下的有机质积累能力更强。植物的P可以表现植物养分的限制模式,Koerselman^[24]认为N:P<14时,N元素成为植物生长的限制性元素;N:P>16时,P元素成为限制植物生长的元素;当N:P值介于两者之间,N、P元素成为限制植物生长的共同元素。以Koerselman的结论为依据,该地区植物的N:P值整体介于14~16之间,且在中度放牧强度下高于16,因此认为研究区内植物生长受到N、P元素的共同限制,并且研究中克氏针茅地上部分的N:P值高于克氏针茅地下部分的,随着放牧强度增加有先升高后降低的趋势,这与张婷等^[25]的研究结果相同。在自然陆地生态系统中,N和P是限制植物生长的主要营养元素,因此在相关试验中很重视N、P比例的调控。

3.2 放牧对荒漠草原土壤元素含量及其化学计量值的影响

放牧是否能够影响土壤中营养元素的含量并没

有一个统一的定论^[13,15,26]。一些人认为放牧可以影响土壤中元素的含量变化^[27],也有人与之持有相反的观点,有些研究者指出放牧与土壤中营养元素的含量具有较为复杂的关系,不同的营养元素受到放牧的影响不同^[28]。本研究通过在不同放牧强度下荒漠草原克氏针茅种群及其生境下的土壤采样分析后发现,研究区放牧强度的加大对土壤中C含量没有明显影响,使克氏针茅地上部分的C含量下降,同时导致克氏针茅地下部分C含量增加,原因可能为放牧时牛羊啃食植物的地上部分,使植物机体受损,影响其固C能力,导致地上部分C含量下降,而地下部分仍保持活跃,从而使C元素增多。研究区的放牧强度增加对土壤中全N含量影响不显著,但在中度放牧强度下,土壤中全N含量最高。初步推断认为:虽然土壤中N来源有有机体的排泄物,但是有机体排泄物的分解需要时间,所以土壤中的氮含量变化不明显。随着放牧强度的增加,土壤中全磷含量增加,这与石福等^[29]研究的结果相一致,但增加的幅度不是很大,可能是因为放牧时牛羊的排泄物中含有充分的磷元素,但是由于转化周期较长,所以土壤中的全磷含量呈弱增长趋势。C:N、C:P能够反映出土壤中有机物分解和积累的程度,N、P的含量对土壤中的肥力具有重要的影响作用。并且对植物体内养分的积累和分配具有重要的影响作用^[30]。研究区内土壤中P含量与土壤中的N含量、N:P及C:P均呈显著负相关($P<0.05$),说明土壤中的P含量直接决定土壤中的N含量。

参考文献:

- [1] 戴雅婷,那日苏,吴洪新,等.我国北方温带草原碳循环研究进展[J].草业科学,2009,26(9): 43-48.
DAI Y T, NARISU, WU H X, et al. The research progress of carbon cycle in temperate grassland of north China [J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(9): 43-48.
- [2] CHAPIN F S, FOLKE C, KOFINAS G P. A Framework for Understanding Change[M]// Principles of Ecosystem Stewardship. New York: Springer New York, 2009: 3-28.
- [3] FEE BUSBY, 王明玖.草地的重要性及草地管理面临的挑战[J].内蒙古草业,1988,(2): 60-63.
BUSBY F, WANG M J. Importance of grassland and challenges faced by grassland management[J]. *Inner Mongolia Prataculture*, 1988, (2): 60-63.
- [4] COLLINS S L. Modulation of diversity by grazing and mowing in native tallgrass prairie [J]. *Science*, 1998, 280 (5 364): 745-747.
- [5] 杜国祯,覃光莲,李自珍,等.高寒草甸植物群落中物种丰富度与生产力的关系研究[J].植物生态学报,2003,27(1): 125-132.
- [6] 鲍雅静,李政海,刘 惠.放牧与割草影响下羊草草原植物与群落能量固定及分配规律的比较[J].大连民族学院学报,2006,8(1): 9-12.
BAO Y J, LI Z H, LIU H. The effects of mowing and grazing on energy fixation and allocation of steppe community in Xilin-goule, Inner Mongolia[J]. *Journal of Dalian Nationalities University*, 2006, 8(1): 9-12.
- [7] 郑晓翻,王瑞东,靳甜甜,等.呼伦贝尔草原不同草地利用方式下生物多样性与生物量的关系[J].生态学报,2008,28(11): 5 392-5 400.
ZHENG X X, WANG R D, JIN T T, et al. Relationships between biodiversity and biomass under different regimes of grassland use in Hulunbeir, Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5 392-5 400.
- [8] ELSER J J, ACHARYA K, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota[J]. *Ecology Letters*, 2003, 6 (10):

- 936-943.
- [9] DAUFRESNE T, LOREAU M. Plant-herbivore interactions and ecological stoichiometry: when do herbivores determine plant nutrient limitation? [J]. *Ecology Letters*, 2001, **4**(3): 196-206.
- [10] SUNDARESHWAR P V. Phosphorus limitation of coastal ecosystem processes[J]. *Science*, 2003, **299**(5 606): 563-565.
- [11] 杨惠敏, 王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J]. 草业学报, 2011, **20**(2): 244-252.
- YANG H M, WANG D M. Advances in the study on ecological stoichiometry in grass-environment system and its response to environmental factors[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, **20**(2): 244-252.
- [12] 卫智军, 李霞, 刘红梅, 等. 呼伦贝尔草甸草原群落特征对不同放牧制度的响应[J]. 中国草地学报, 2011, **33**(1): 65-70.
- WEI Z J, LI X, LIU H M, et al. Response of meadow steppe community characteristics to different grazing systems in Hulunbeir[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, **33**(1): 65-70.
- [13] 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[J]. 草地学报, 1998, **6**(2): 90-98.
- LI X Z, CHEN Z Z. Influences of stocking rates on C, N, P contents in plant-soil system[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 1998, **6**(2): 90-98.
- [14] 张艳博, 罗鹏, 孙庚, 等. 放牧对青藏高原东部两种典型高寒草地类型凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(15): 4 605-4 617.
- ZHANG Y B, LUO P, SUN G, et al. Effects of grazing on litter decomposition in two alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(15): 4 605-4 617.
- [15] FRANK D A. Ungulate and topographic control of nitrogen: phosphorus stoichiometry in a temperate grassland; soils, plants and mineralization rates[J]. *Oikos*, 2008, **117**(4): 591-601.
- [16] 刘颖, 王德利, 王旭, 等. 放牧强度对羊草草地植被特征的影响[J]. 草业学报, 2002, **11**(2): 22-28.
- LIU Y, WANG D L, WANG X, et al. The effect of grazing intensity on vegetation characteristics in *Leymus chinensis* grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, **11**(2): 22-28.
- [17] 贾婷婷, 袁晓霞, 赵洪, 等. 放牧对高寒草甸优势植物和土壤氮磷含量的影响[J]. 中国草地学报, 2013, **35**(6): 80-85.
- JIA T T, YUAN X X, ZHAO H, et al. Effects of grazing intensity on N and P content in dominant plants and soil in the northeast regions of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, **35**(6): 80-85.
- [18] LIU K S, SOLLENBERGER L E, SILVEIRA M L, et al. Grazing intensity and nitrogen fertilization affect litter responses in 'Tifton 85' bermudagrass pastures: II. decomposition and nitrogen mineralization[J]. *Agronomy Journal*, 2011, **103**(1): 163-168.
- [19] 王勋, 朱练峰, 戴廷波, 等. 不同环境和基因型条件下水稻植株的糖氮比变化及其与产量形成的关系[J]. 中国稻米, 2008, **14**(6): 11-15.
- WANG X, ZHUL F, DAI T B, et al. Changes of plant C/N ratio during filling and their relationships with grain yield formation in rice genotypes under two environments[J]. *China Rice*, 2008, **14**(6): 11-15.
- [20] HONG J T, WANG X D, WU J B. Effects of soil fertility on the N : P stoichiometry of herbaceous plants on a nutrient-limited alpine steppe on the northern Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2015, **391**(1-2): 179-194.
- [21] JUAN D, LEÓN PELÁEZ, MARÍA I, et al. Reallocation and nutrient use efficiency in Antioquia central forests[J]. *Revista Colombia Forestal*, 2009, **12**(1): 119-140.
- [22] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377-385.
- [23] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2008, **3**(6): 540-550.
- [24] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**(6): 1 441.
- [25] 张婷, 翁月, 姚凤娇, 等. 放牧强度对草甸植物小叶章及土壤化学计量比的影响[J]. 草业学报, 2014, **23**(2): 20-28.
- ZHANG T, WENG Y, YAO F J, et al. Effect of grazing intensity on ecological stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and meadow soil[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, **23**(2): 20-28.
- [26] 刘楠, 张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响[J]. 草业科学, 2010, **27**(4): 11-14.
- LIU N, ZHANG Y J. Effects of grazing on soil organic carbon and total nitrogen in typical steppe[J]. *Pratacultural Science*, 2010, **27**(4): 11-14.
- [27] 安钰, 安慧, 李生兵. 放牧对荒漠草原土壤和优势植物生态化学计量特征的影响[J]. 草业学报, 2018, **27**(12): 94-102.
- AN Y, AN H, LI S B. Effects of grazing on ecological stoichiometry of soil and dominant plants in desert grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, **27**(12): 94-102.
- [28] 丁小慧, 宫立, 王东波, 等. 放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(15): 4 722-4 730.
- DING X H, GONG L, WANG D B, et al. Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(15): 4 722-4 730.
- [29] 石福于, 王毅, 付晓锐, 等. 不同放牧强度下祁连山东段草地生态系统氮磷计量特征[J]. 家畜生态学报, 2017, **38**(3): 61-66.
- SHI F Y, WANG Y, FU X Y, et al. Metrological characteristics of nitrogen and phosphorus in grassland ecosystem under different grazing intensity in east of Qilian Mountain[J]. *Acta Ecologae Animalis Domestici*, 2017, **38**(3): 61-66.
- [30] MÉNDEZ M, KARLSSON P S. Nutrient stoichiometry in *Pinguicula vulgaris*: nutrient availability, plant size, and reproductive status[J]. *Ecology*, 2005, **86**(4): 982-991.