

DOI: 10.5846/stxb201901130107

勒佳佳, 苏原, 罗艳, 耿凤展, 朱玉梅, 李凯辉, 刘学军. 围封对天山高寒草原 4 种植物叶片和土壤化学计量学特征的影响. 生态学报, 2020, 40(5): 1621-1628.

Le J J, Su Y, Luo Y, Geng F Z, Zhu Y M, Li K H, Liu X J. Effects of grazing and enclosure on leaves of four plants and soil stoichiometry in an alpine grassland of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1621-1628.

围封对天山高寒草原 4 种植物叶片和土壤化学计量学特征的影响

勒佳佳^{1,2,3}, 苏原^{1,2,3}, 罗艳^{1,3}, 耿凤展^{1,3}, 朱玉梅⁴, 李凯辉^{1,2,5,*}, 刘学军^{1,6}

1 中国科学院新疆生态与地理研究所干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院巴音布鲁克草原生态系统研究站, 巴音布鲁克 841314

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 新疆和静县巴音布鲁克景区管理委员会, 库尔勒 841000

5 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 乌鲁木齐 830011

6 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

摘要: 以中国科学院巴音布鲁克草原生态系统研究站长期围栏内外的羊茅 (*Festuca ovina*)、天山赖草 (*Leymus tiansecalinus*)、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*) 和鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*) 4 种植物叶片和土壤为研究对象, 分析了放牧与围封对植物叶片和土壤 C、N、P 的化学计量特征的影响。结果表明, 围封样地土壤养分浓度整体高于放牧样地 ($P < 0.05$), 全氮 (TN) 浓度除外。围封显著增加羊茅叶片 C、N 浓度 ($P < 0.05$), 对 P 浓度影响不显著; 围封显著增加鹅绒委陵菜叶片的 C 浓度, 但是显著降低叶片的 N 和 P 浓度 ($P < 0.05$), 围封对天山赖草和二裂委陵菜养分含量影响不显著。围封显著增加鹅绒委陵菜 C:N 和 C:P ($P < 0.05$); 围封显著降低羊茅 C:N、C:P 和增加 N:P ($P < 0.05$); 围封显著降低二裂委陵菜 C:N ($P < 0.05$), 对天山赖草的化学计量特征影响不显著。不同植物对围封的响应不同, 意味着长期围封可能会改变天山高寒草原生态系统的结构。围封降低优势种 (羊茅) 的固碳能力, 增加退化期出现的代表性植物 (鹅绒委陵菜) 的固碳能力, 表明在长期围封下植物凋落物中的杂类草 (鹅绒委陵菜) 可能更多的为土壤提供碳来源, 也能促进优势禾本科物种的氮含量和碳含量的增加。

关键词: 植物叶片; 土壤; 化学计量学; 围封; 高寒草原

Effects of enclosure on leaves of four plants and soil stoichiometry in an alpine grassland of Tianshan Mountains

LE Jiajia^{1,2,3}, SU Yuan^{1,2,3}, LUO Yan^{1,3}, GENG Fengzhan^{1,3}, ZHU Yumei⁴, LI Kaihui^{1,2,5,*}, LIU Xuejun^{1,6}

1 CAS Key Laboratory of Biogeography and Bioresource in Arid Land, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Urumqi 830011, China

2 Bayinbuluk Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Bayinbuluk 841314, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Management Committee of Bayinbuluk Scenic Area in Hejing County, Korla 841000, China

5 Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

6 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: To determine effects of grazing and enclosure on the ecological stoichiometry characteristics, we evaluated the carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) contents in soil and leaves of four plants, which were *Festuca ovina*, *Leymus*

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2016D01A076)

收稿日期: 2019-01-13; 网络出版日期: 2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: likh@ms.xjb.ac.cn

tiansecalinus, *Potentilla bifurca* and *Potentilla anserine*, inside and outside the fence of the Bayinbuluk Grassland Ecological Research Station, Chinese Academy of Sciences. The results showed that soil nutrient content of enclosed grassland was significantly higher than that of grazing site, except total nitrogen (TN) content ($P < 0.05$). The enclosure significantly increased the content of C and N in the leaves of *Festuca ovina* ($P < 0.05$), but it did not significantly affect the content of P. The enclosure significantly increased the C content ($P < 0.05$), but it significantly reduced the N and P content in the leaves of *Potentilla anserine*. Effects of the enclosure on the nutrient content of *Leymus tiansecalinus* and *Potentilla bifurca* were not significant. The enclosure significantly increased C:N and C:P of *Potentilla anserine* ($P < 0.05$), while it significantly reduced C:N, C:P and increased N:P of *Festuca ovina* ($P < 0.05$). The enclosure significantly reduced C:N of *Potentilla bifurca* ($P < 0.05$), but it had no significant effect on the stoichiometric characteristics of *Leymus tiansecalinus*. The different species had different responses to the enclosure, meaning that long-term enclosure may change the structure of the Tianshan alpine grassland ecosystem. The enclosure reduced the carbon sequestration capacity of the dominant plant species (*Festuca ovina*) and increased the carbon sequestration capacity of the forb (*Potentilla anserine*) in the degradation stage. In long-term enclosure, *Potentilla anserine* may provide more carbon for the soil, and it also could promote nitrogen and carbon content of the dominant grass species.

Key Words: plant leaf; soil; stoichiometry; enclosure; alpine grassland

生态化学计量学是研究生态过程中能量平衡和多重化学元素平衡的科学,为解决生态系统养分供求与循环问题提供了新思路^[1-2],为碳(C)、氮(N)和磷(P)元素在森林^[3]、草地^[4]、湿地^[5]、荒漠^[6]等生态系统中的耦合关系研究提供了有效手段。N和P是陆地生态系统中重要的养分,控制着生物地球化学循环过程。外界环境的改变会引起植物养分需求变化,当土壤中N、P元素缺乏或者过量时,根据N:P判断植物受N或P相对限制情况^[7]。通过研究植物叶片N、P含量及其化学计量比,可了解土壤养分状况及植物的养分吸收和同化能力,因为植物与土壤通常存在互馈的关系^[8]。通过化学计量学来研究草原植物养分吸收利用对环境变化的响应机制成为了当前干旱区生态学研究的重要内容。

放牧是草原最普遍的利用和管理方式。放牧不仅直接影响草地植物的群落组成、初级生产力、生物多样性和生态系统稳定性^[9],也能间接改变土壤养分含量、微生物群落结构和理化性质^[10-11],因此放牧-植被-土壤是紧密联系的^[12]。张婷等^[8]通过不同放牧强度对东北三江平原土壤养分含量进行定量分析,放牧降低了土壤全碳的含量,土壤表层的全氮含量随放牧强度的增加呈先增加后降低的趋势,且以重牧区为最小。丁小慧等^[13]通过围封对呼伦贝尔草原的草甸草原的土壤养分含量定量分析,认为围封会增加土壤全碳、全氮、全磷和速效磷的含量,但降低硝态氮的含量。据松嫩平原研究报告,在低植物多样性背景下,不同放牧方式对土壤C含量影响不显著^[14],但显著增加土壤N可利用性^[15];在高植物多样性背景下,牛羊混合放牧显著增加土壤C含量^[14],但对土壤N可利用性影响不显著^[15]。许雪赟等^[16]通过研究围封对青藏高原植物叶片化学计量特征的影响,认为围封显著增加植物叶片C含量,显著降低植物叶片P含量,对N含量影响不显著。Bai等^[17]通过在内蒙古草原研究围封对植物影响,认为围封降低植物氮含量、增加植物C:N。李香真等^[18]不同放牧率植物和根计量化学特征定量分析,认为轻度放牧下植物和根中C:N和C:P降低。以上有关放牧与围封对草原生态系统土壤和植物的化学计量学特征的影响的研究主要集中在在我国青藏高原、内蒙古草原、东北草地等区域,而且关于放牧对草地生态系统养分含量的影响的研究,通常将植物群落^[19-20]和土壤^[21-22]分开研究,对更好地揭示和理解生态系统养分循环的机制具有局限性。

新疆天山高寒草原的合理利用对于牧区社会稳定、经济发展和生态安全等至关重要。研究天山高寒草原放牧与围封草地植物叶片和土壤养分含量及其化学计量特征之间的关系,可以为该研究区域的植物化学计量学研究补充数据,有益于诊断放牧与围封草地植物正向演替时的养分限制元素^[23]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院巴音布鲁克草原生态系统研究站开展(42°52′45.52″—42°53′10.28″N, 83°41′45.21″—83°43′07.38″E), 巴音布鲁克草原面积约 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 海拔 2467 m, 年均气温 -4.8°C , 1 月最低气温 -48°C 。年平均风速 2.7 m/s, 年降水量 267 mm, 年蒸发量 1022.9—1247.5 mm, 年日照 2466—2616 h, 全年积雪日达 150—180 d, 无绝对无霜期, 属于典型的高寒气候。高寒草原植物群落的物种单一, 7—11 个/ m^2 , 羊茅 (*Festuca ovina*) 为新疆天山高寒草原的优势物种, 天山赖草是草原干旱化出现的一种代表性植物, 委陵菜属是该草原退化的标志, 土壤类型为栗钙土。

1.2 野外采样

调查取样时间为 2018 年 10 月份, 围封取样点设在中国科学院巴音布鲁克草原生态系统研究站内, 围栏于 2005 年建立。放牧样地设在围栏外, 属于春季牧场, 利用时间为每年 2 月下旬至 5 月下旬, 自由放牧。在围封样地内, 选取 4 个样方 (4 m×8 m), 每个样方内采集优势植物羊茅 (*Festuca ovina*), 记作 (F.O)、天山赖草 (*Leymus tiansecalinus*), 记作 (L.T)、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*), 记作 (P.B)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserine*), 记作 (P.A) 4 种植物的叶片。每种植物选取 10 株, 选择健康、完整的叶片进行采摘。按种分类装入信封袋。同时, 在每个样地内按照 “S” 型用土钻取 5 钻表层 (0—10 cm) 土壤, 混合作为一个土壤样品, 装入带有标志的自封袋, 带回实验室分析。在围栏外的自由放牧区, 同步分别采取了土壤和植物样品。

将采集的植物叶片样品先经 105°C 杀青 30 min, 并在 65°C 烘干至恒量。植物叶片用球磨仪磨碎后过 0.15 mm 筛, 标记好装入自封袋, 用于测定植物叶片全碳 (C)、全氮 (N)、全磷 (P) 的含量。全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定, 全磷含量采用钼锑抗比色法测定, 植物叶片碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; C、N 和 P 的测定结果以单位质量的养分含量表示 (mg/g), C、N、P 化学计量比较均采用质量比表示。

土壤样品在室内自然风干, 清除草根和小石头等杂质, 磨细过 0.25 mm 筛, 标记好装入自封袋, 以备实验测试分析之用。土壤有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾滴定法, 全氮 (TN) 采用凯氏定氮法, 全磷 (TP) 采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法。

1.3 数据处理

采用 SPSS 23.0 对数据进行统计分析, 用 Origin 9.0 作图。对放牧与围封样地的土壤和植物叶片养分含量及化学计量学特征的差异性进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)、独立样本 T 检验、LSD 和 Dunnett 多重比较法。采用变异系数 (CV) 比较各物种叶片 N、P 含量及 N:P 的稳定性 (或变异性)^[20]: $0 \leq \text{CV} < 0.15$ 为弱变异, $0.15 \leq \text{CV} < 0.35$ 为中等变异, $\text{CV} \geq 0.35$ 为强变异。Pearson 相关分析用于解析植物养分含量及化学计量学特征之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质及化学计量比

研究结果表明: 与放牧样地相比, 围封样地显著增加土壤 SOC、TN、AN、AP 含量 ($P < 0.05$), 分别是放牧样地的 2.2 倍、2.3 倍、1.4 倍和 2.3 倍 (表 1), 围封没有显著影响土壤 TP 含量。由于土壤养分含量对样地管理方式的响应机制并不一致, 导致土壤养分的比值存在差异 (表 1)。围封显著增加 SOC:TN、TN:TP ($P < 0.05$), 围封显著降低 AN:AP ($P < 0.05$), 对 SOC:TP 不存在显著差异。

2.2 放牧与围封样地植物养分含量和化学计量比特征

通过放牧与围封对不同植物叶化学计量特征的研究发现, 放牧和围封对植物叶片 C、N、P 元素含量及其化学计量特征影响并不一致 (图 1)。与放牧样地相比, 围封显著增加鹅绒委陵菜叶片的 C 浓度, 但是显著降低叶片的 N 和 P 浓度 ($P < 0.05$); 围封显著增加羊茅叶片的 N 浓度, 显著降低 C 浓度 ($P < 0.05$), 但是对

P 浓度影响不显著 ($P > 0.05$); 围封对天山赖草 C、N 和 P 浓度影响均不显著 ($P > 0.05$); 围封对二裂委陵菜叶片 C 和 N 浓度影响不显著 ($P > 0.05$), 但是显著增加 P 浓度 ($P < 0.05$)。因植物叶片 C、N、P 元素含量对草地管理方式的响应机制并不一致, 导致植物叶片养分化学计量特征存在差异。与放牧样地相比, 围封显著降低羊茅 C:N, 二裂委陵菜和羊茅叶片 C:P ($P < 0.05$), 显著增加鹅绒委陵菜叶片的 C:N 和 C:P; 围封显著增加羊茅叶片的 N:P ($P < 0.05$), 而对其他植物叶片内 N:P 影响不显著, 综合分析表明: 4 种植物叶片的 N:P < 14。综上, 围封对天山赖草的 C、N、P 浓度及化学计量学特征无显著影响, 而显著改变了羊茅和鹅绒委陵菜的养分含量及其化学计量学特征。

表 1 放牧与围封样地土壤理化性质及化学计量比

Table 1 Soil physicochemical properties and stoichiometric ratio in grazing and enclosure site

指标 Index	放牧 Grazing	围封 Enclosure	指标 Index	放牧 Grazing	围封 Enclosure
有机碳 SOC (mg/g)	19.19±1.66b	42.15±4.95a	SOC:TN	11.69±0.95a	11.07±1.34a
全氮 TN (mg/g)	1.65±0.10b	3.81±0.10a	SOC:TP	29.88±3.75b	65.83±8.43a
全磷 TP (mg/g)	0.67±0.09a	0.64±0.05a	TN:TP	2.57±0.32b	5.94±0.22a
速效氮 AN (mg/kg)	183.71±4.12b	258.68±19.88a	AN:AP	45.64±3.16a	27.70±2.02b
速效磷 AP (mg/kg)	4.10±0.34b	9.33±0.20a			

同行不同小写字母表示放牧与围封草地所测指标的平均值存在显著差异 ($P < 0.05$); SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; AN: 速效氮 Available nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus

2.3 放牧与围封样地植物叶片与土壤化学计量特征的关系

围封在一定程度上改变了植物叶片化学计量特征与土壤化学计量特征的关系。对于放牧样地来说, 天山赖草叶片 N 含量与土壤 SOC 呈显著负相关 ($P < 0.05$, 相关系数 $r = -0.956$), P 含量与土壤 STP、SOC:TP 分别呈显著负相关 ($P < 0.05$, $r = -0.98$) 和显著正相关 ($P < 0.05$, $r = 0.957$)。羊茅叶片的 P 含量和 C:P 分别与土壤 TN:TP 存在显著负相关 ($P < 0.01$, $r = -0.995$) 和显著正相关 ($P < 0.01$, $r = 0.997$)。鹅绒委陵菜叶片 C 含量、P 含量与土壤 TN 存在显著正相关 ($P < 0.01$, $r = 0.998$; $P < 0.05$, $r = 0.974$)。而二裂委陵菜叶片养分与土壤化学计量特征无显著相关性。围封样地, 从单个植物分析可得, 天山赖草叶片 N 含量分别和土壤 SOC:STN 和 SOC:TP 存在显著正相关 ($P < 0.05$, $r = 0.958$; $P < 0.05$, $r = 0.976$), 叶片 C:N 和土壤 SOC:TP 存在显著负相关 ($P < 0.05$, $r = -0.99$), 叶片 N:P 和土壤 TN:TP 存在显著正相关 ($P < 0.05$, $r = 0.976$)。羊茅叶片 N 和土壤 TP 存在显著负相关 ($P < 0.05$, $r = -0.973$), P 含量与土壤 SOC:TP 存在显著正相关 ($P < 0.05$, $r = 0.951$), C:N 和土壤 TP 存在显著正相关 ($P < 0.05$, $r = 0.977$)。而二裂委陵菜和鹅绒委陵菜叶片养分与土壤化学计量特征无显著相关性。所以, 围封改变了天山赖草、二裂委陵菜和鹅绒委陵菜叶片化学计量特征与土壤化学的相关性。

放牧样地和围封样地, 除了羊茅和鹅绒委陵菜叶片 N:P 的变异系数在 $0 < CV < 0.15$ 范围之内 (表 2), 其余物种各指标的变异系数在 $0.15 < CV < 0.35$, 由此可见, 植物的叶片化学计量学特征呈现较大变异性, 而且 4 种植物叶片化学计量特征变化也未呈现出高度一致性, 表明不同植物对养分限制和利用的特点不同。天山赖草和二裂委陵菜的 N、P 与 N:P 的变异系数均大于羊茅和鹅绒委陵菜, 表明天山赖草和二裂委陵菜叶片内的 N、P 和 N:P 可塑性较羊茅和鹅绒委陵菜大。

表 2 不同管理方式下 4 种植物叶片化学计量特征的变异系数

Table 2 4 coefficients of variation in the characteristics of leaf stoichiometry in the four plants in different management

放牧 Grazing	N	P	N:P	围封 Enclosure	N	P	N:P
L.T	0.23	0.04	0.20	L.T	0.17	0.27	0.38
P.B	0.27	0.10	0.25	P.B	0.16	0.06	0.17
F.O	0.14	0.03	0.13	F.O	0.17	0.05	0.14
P.A	0.04	0.03	0.05	P.A	0.14	0.08	0.12

L.T: 天山赖草 *Leymus tiansecalinus*; P.B: 二裂委陵菜 *Potentilla bifurca*; F.O: 羊茅 *Festuca ovina*; P.A: 鹅绒委陵菜 *Potentilla anserine*

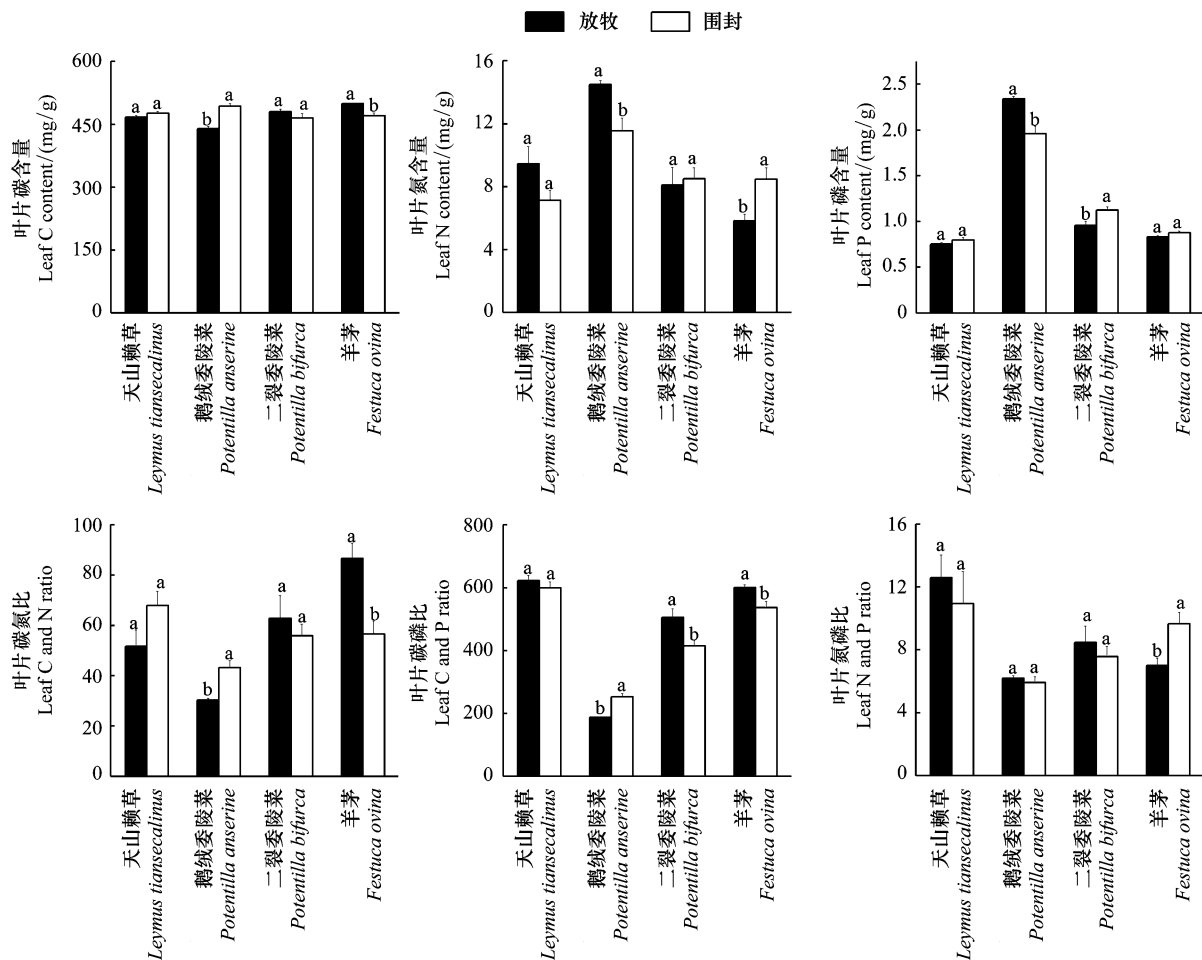


图 1 放牧与围封对 4 种植物叶片养分含量及其化学计量比的影响

Fig.1 Effects of grazing and enclosure on nutrient content and stoichiometric ratios of leaves for 4 plants species

L.T: 天山赖草 *Leymus tiansecalinus*; P.A: 鹅绒委陵菜 *Potentilla anserine*; P.B: 二裂委陵菜 *Potentilla bifurca*; F.O: 羊茅 *Festuca ovina*; 不同小写字母表示同意植物在不同管理方式下的显著性差异

3 讨论

3.1 放牧与围封方式对土壤的影响

3.1.1 放牧与围封对土壤理化性质的影响

放牧活动过程中,牛羊的采食行为对自然植被影响的同时,也减少了凋落物的生物量,进而影响土壤中的养分含量和分配格局,由于土壤养分在输入输出以及动态转化过程中的复杂性,关于放牧与围封对土壤养分含量影响的研究结果不尽一致^[13-15]。本研究结果显示,围封样地 SOC、STN、AN 和 AP 显著高于放牧样地。由于土壤有机质的总量取决于生物量的生产与分解的平衡状态以及土壤储存有机质的能力,牛羊啃食牧草量增加,草地生物量生产与分解的平衡状态失衡,归还给土壤的有机质含量减少,从而导致土壤有机质含量下降,而围封则大大增加草地的地上生物量,王玉辉等^[24]和韦应莉等^[25]的相关研究也表现出一致性的研究结果。围封对土壤速效养分影响显著,这与速效养分是轻组有机质的主要组成部分密切相关,其主要来源于落叶和植物残体。速效磷和速效氮含量表现为围封样地显著高于放牧样地,与张风承等^[21]等研究结果一致,围封增加土壤养分含量在草原生态系统的研究结果普遍存在。

3.1.2 放牧与围封对土壤化学计量的影响

研究土壤化学计量特征(SOC、TN 和 TP 的比值),不仅可了解土壤质量,探究土壤养分之间的耦合关系,还可揭示养分的可获得性^[26]。放牧样地的SOC:TN 为 11.69,围封样地 SOC:TN 为 11.07,均在中国土壤 SOC:TN(10—12)范围内^[27],说明巴音布鲁克草原的土壤有机质分解良好。SOC:TP 是判断土壤磷矿化能力、微生物矿化土壤有机物释放磷或从环境中吸收磷潜力的指标^[28]。放牧样地 SOC:TP 为 29.80,围封样地土壤 SOC:TP 为 65.83,都小于 200,说明该地区有利于微生物在有机质分解过程中释放养分,从而提高土壤磷的有效性^[29];放牧和围封样地的 TN:TP 分别为 2.57 和 5.94,前者低于我国样地土壤的平均值(5.2)^[30],后者高于我国草地土壤平均值。导致这种差异的原因可能是围封方式显著增加土壤 N 含量,而对土壤 P 含量影响不显著。

3.2 放牧和围封对植物叶片养分含量和化学计量特征影响

无论是放牧样地还是围封样地,植物叶片的 C 含量均高于全国水平草原 C 含量(438 g/kg),平均 N 含量均低于青藏高原草地(24.86 g/kg)和内蒙古草原(26.8 g/kg)^[31]。4 种植物叶片平均 P 含量(除了鹅绒委陵菜)都低于全国平均水平(1.4 g/kg)^[32],P 主要来自化石风化,降水量少和干旱的气候条件使矿质风化速率降低,本研究区年降水量 267 mm,降水量少是导致叶片 P 含量低于其他地区的可能原因。C:N 和 C:P 作为植物重要的生理指标,代表着植物吸收营养元素和同化碳的能力,以及植物固碳效率的高低。天山赖草、二裂委陵菜和羊茅叶片在不同管理方式下 C:N 和 C:P 都高于全球水平(23.80、300.90)^[33],说明这三种植物具有较高固碳潜能和养分利用策略且同化碳的能力较强。而围封显著降低羊茅 C:N、C:P,这表明围封降低羊茅的吸收营养元素和同化碳的能力和固碳效率;围封显著增加鹅绒委陵菜 C:N 和 C:P,这表明围封增加鹅绒委陵菜的吸收营养元素和同化碳的能力和固碳效率,而羊茅是巴音布鲁克草原的建群种,鹅绒委陵菜是草原退化的典型植物,这表明鹅绒委陵菜相比其他植物固碳能力和养分利用策略等方面具有优势,罗艳等^[34]研究结果也表明叶片 C:N 和 C:P 比值较高的植物,固碳能力和养分利用策略等方面具有优势。本研究结果也表明,围封显著降低羊茅叶片的碳含量,鹅绒委陵菜的 C 碳含量显著增加,而土壤碳的累积一部分来自凋落物,所以在长期围封下鹅绒委陵菜可能更多的为土壤提供碳来源。叶片的 N:P 比作为判断环境对植物生长的养分供应状况的指标,目前用 N:P 阈值作为指示植物生长受 N 或 P 元素限制已得到普遍认可,本研究中四种植物叶片在不同管理方式下 N:P 都小于 14,表明天山巴音布鲁克高寒草原植物生长更倾向于受到 N 素限制,这与 P 素被认为是巴音布鲁克草原植物生长主要限制元素结论不一致^[35],主要原因是因为前人的研究结果是施氮背景下的,氮添加显著提高植物生物量,使得植物从土壤中获得更多 P 元素来维持植物自身化学计量内稳性,同时,氮添加显著抑制草原凋落物分解,使大量养分不能及时归还土壤,P 元素来源主要靠岩石风化和成土过程等,补给缓慢,进而加剧草原土壤 P 限制。

与放牧样地相比,围封对 4 种植物 C、N、P 浓度的影响呈现一定程度的差异。围封样地鹅绒委陵菜叶片 C 浓度显著高于放牧样地,而羊茅 C 浓度显著低于放牧样地。围封样地鹅绒委陵菜叶片的 N、P 浓度均低于放牧样地,围封样地羊茅的 N、P 浓度均高于放牧样地。这些结果表明围封对植物叶片养分的影响与物种有关。安钰等^[36]研究结果也表明,围封会降低、增加或不影响某些物种养分浓度,丁小慧等^[13]也证实了不同物种养分浓度对围封的响应存在不同特点,其原因可能是植物的生活型不同。

本研究的 4 种植物叶片的养分含量和化学计量比对围封的响应表现出特异性,这种差异的存在很可能是物种之间性状互补和生态位分离的表现,有利于物种共存以及群落多样性和稳定性的维持。不同植物的化学计量特征对围封的响应不同,意味着长期围封可能会改变天山高寒草原优势植物和杂类草的养分变化,围封对草原生态系统的结构会产生影响在前人的工作中得到证实^[37]。不同物种养分含量和计量特征发生的改变对于预测未来养分富集情况下植物群落组成的改变将具有重要参考意义。在实际生产实践中,如何通过适宜的围封管理对天山高寒草原进行改良和利用,在维持植物群落的生物多样性和稳定性的前提下,提升优质牧草生物量和养分含量,需要对植物和土壤生态化学计量特征开展深入研究。

3.3 植物与土壤 C、N、P 化学计量特征的相关性

植物和土壤是生物地球化学循环的两个重要纽带,二者之间通过植物根系等紧密联系,植物从土壤中吸收养分,又以凋落物和根际分泌物质返回土壤,所以植物体内养分含量体现了植物对环境的适应,土壤养分状况反应了植物的养分需求。植物生长的环境存在差异性,土壤养分含量也存在差异性,而这种差异会影响植物叶片的化学计量特征^[34]。本研究中,与放牧相比,围封在一定程度上改变了植物叶片化学计量特征与土壤化学计量特征的关系。原因可能是围封显著改变土壤养分含量,进而影响植物-土壤间养分吸收和传递的关系。4 种植物叶片与土壤化学计量特征的相关性不显著,说明土壤养分对这 4 种植物的直接影响作用不密切,与戚德辉等^[38]研究结果相同。植物自身对环境的适应可能是植物叶片的化学计量特征的主要影响因素,并非受土壤养分限制引起^[38]。

从个体植物而言,植物叶片和土壤化学计量特征间存在有一定的相关性。例如,放牧样地的鹅绒委陵菜叶片 C、P 含量和土壤 N 含量呈显著正相关,土壤养分对鹅绒委陵菜生长具有一定促进作用。4 种植物叶片的 C、N、P 含量与土壤 P 含量相关性不显著,这与丁小慧等^[13]的研究结果相同,因为土壤 P 在土壤中的迁移性较差,植物吸收利用的土壤 P 含量相对 N 含量较少。影响放牧样地的羊茅和天山赖草,以及围封样地的天山赖草的叶片化学计量的因素与土壤养分含量相关。而二裂委陵菜叶片化学计量特征与土壤化学计量特征未表现出显著相关性,表明高寒草原不同植物对生存环境特殊的适应机制。

4 结论

综上所述,本研究测定了新疆天山高寒草原放牧与围封样地四种植物叶片与土壤 C、N、P 含量及其化学计量比特征,并分析了 4 种植物叶片和土壤的 C、N、P 生态化学计量特征的相关性,得出以下结论:

(1) 围封降低建群种(羊茅)的固碳能力,增加退化期出现的代表性植物(鹅绒委陵菜)的固碳能力,表明在长期围封下植物凋落物中的杂类草(鹅绒委陵菜)可能更多的为土壤提供碳来源。

(2) 围封对高寒草原植物叶片 C、N、P 浓度及化学计量特征的影响并不一致。与放牧样地相比,围封显著增加鹅绒委陵菜叶片的 C 浓度,但是显著降低 N 和 P 浓度;显著增加羊茅叶片的 C、N 浓度,但是对 P 浓度影响不显著,表明长期围封能促进优势禾本科物种的氮含量和碳含量的增加;而对天山赖草 C、N 和 P 浓度和对二裂委陵菜叶片 C 和 N 浓度影响不显著。围封显著影响鹅绒委陵菜 C:N 和 C:P 和羊茅 C:N、C:P 和 N:P。

(3) 围封在一定程度上改变了植物叶片与土壤化学计量特征的关系。放牧样地羊茅 P 浓度与土壤 TN:TP 存在显著正相关,而围封样地羊茅 P 浓度与土壤 SOC:TP 存在显著负相关;放牧样地鹅绒委陵菜叶片 C、P 浓度与土壤 TN 存在显著正相关,围封样地鹅绒委陵菜叶片 C、P 与土壤 TN 不存在显著相关性。

参考文献(References):

- [1] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: the Biology of elements from Molecules to the Biosphere. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2003: 225-226.
- [2] Wang W J, Wang H M, Zu Y G. Temporal changes in SOM, N, P, K, and their stoichiometric ratios during reforestation in China and interactions with soil depths: Importance of deep-layer soil and management implications. Forest Ecology and Management, 2014, 325: 8-17.
- [3] Wang N, Fu F Z, Wang B T, Wang R J. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus tabulaeformis* forest ecosystems in warm temperate Shanxi Province, north China. Journal of Forestry Research, 2018, 29(6): 1665-1673.
- [4] Wang H Y, Wang Z W, Ding R, Hou S L, Yang G J, Lü X T, Han X G. The impacts of nitrogen deposition on community N:P stoichiometry do not depend on phosphorus availability in a temperate meadow steppe. Environmental Pollution, 2018, 242: 82-89.
- [5] Hu X, Lyu Y L, Liu Y, Li X Y, Sun Z T, Li Z C, Cheng Y Q, Guo L L, Liu L Y. Enclosure on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(3): 718-726.
- [6] 刘珮, 马慧, 智颖, 崔艳, 孙安安, 郭洋楠, 李强, 高天云, 张荷亮, 刘海英. 9 种典型荒漠植物生态化学计量学特征分析. 干旱区研究, 2018, 35(1): 207-216.
- [7] Venterink H O, Wassen M J, Verkoost A W M, Ruiter P C D. Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited

- wetlands. *Ecology*, 2003, 84(8): 2191-2199.
- [8] 张婷, 翁月, 姚凤娇, 史印涛, 崔国文, 胡国富. 放牧强度对草甸植物小叶章及土壤化学计量比的影响. *草业学报*, 2014, 23(2): 20-28.
- [9] 赵丽娅, 钟韩珊, 赵美玉, 张劲. 围封和放牧对科尔沁沙地群落物种多样性与地上生物量的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(10): 1783-1790.
- [10] Feyisa K, Beyene S, Angassa A, Said M Y, Leeuw J D, Abebe A, Megersa B. Effects of enclosure management on carbon sequestration, soil properties and vegetation attributes in East African rangelands. *Catena*, 2017, 159: 9-19.
- [11] 周文萍, 向丹, 胡亚军, 李志芳, 陈保冬. 长期围封对不同放牧强度下草地植物和 AM 真菌群落恢复的影响. *生态学报*, 2013, 33(11): 3383-3393.
- [12] Ren G H, Wang C X, Dong K H, Zhu H S, Wang Y C, Zhao X. Effects of grazing exclusion on soil-vegetation relationships in a semiarid grassland on the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 4071-4079.
- [13] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 李魁, 刘国华. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化. *生态学报*, 2012, 32(11): 3467-3476.
- [14] Chang Q, Wang L, Ding S W, Xu T T, Li Z Q, Song X X, Zhao X, Wang D L, Pan D F. Grazer effects on soil carbon storage vary by herbivore assemblage in a semi-arid grassland. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(5): 2517-2526.
- [15] Liu C, Wang L, Song X X, Chang Q, Frank D A, Wang D L, Li J, Lin H J, Du F Y. Towards a mechanistic understanding of the effect that different species of large grazers have on grassland soil N availability. *Journal of Ecology*, 2018, 106(1): 357-366.
- [16] 许雪贇, 曹建军, 杨淋, 杨书荣, 龚毅帆, 李梦天. 放牧与围封对青藏高原草地土壤和植物叶片化学计量学特征的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1349-1355.
- [17] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, Pan Q M, Zhang L X, Chen S P, Wang Q B, Han X G. Grazing alters ecosystem functioning and C:N:P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49(6): 1204-1215.
- [18] 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.
- [19] 黄晓玉, 傅华, 李旭东, 牛得草, 郭丁, 李晓东. 放牧与围封对黄土高原典型草原植物生物量及其碳氮磷贮量的影响. *草业学报*, 2010, 19(2): 175-182.
- [20] 吴统贵, 吴明, 刘丽, 萧江华. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 23-28.
- [21] 张风承, 史印涛, 李洪影, 王明君, 崔国文. 放牧强度对土壤物理性状和速效养分的影响. *草原与草坪*, 2013, 33(1): 5-10.
- [22] 张义凡, 陈林, 杨新国, 刘学东, 李学斌. 围封与放牧对荒漠草原土壤理化性质的影响. *北方园艺*, 2017, (1): 171-176.
- [23] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [24] 王玉辉, 何兴元, 周广胜. 放牧强度对羊草草原的影响. *草地学报*, 2002, 10(1): 45-49.
- [25] 韦应莉, 曹文侠, 刘玉祯. 不同放牧强度和围封对高寒灌丛草地土壤微生物量的影响. *草原与草坪*, 2018, 38(5): 1-7.
- [26] Torbert H A, Prior S A, Runion G B, Davis M A, Pritchard S G, Rogers H H. Nitrogen and carbon cycling in a model longleaf pine community as affected by elevated atmospheric CO₂. *Environmental Management*, 2004, 33(1 Supplement): S132-S138.
- [27] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2239-2248.
- [29] Bui E N, Henderson B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 2103, 373(1/2): 553-568.
- [30] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [31] He J S, Fang J Y, Wang Z H, Guo D L, Flynn D F B, Geng Z. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, 149(1): 115-122.
- [32] Han W X, Fang J Y, Reich P B, Woodward F I, Wang Z H. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China. *Ecology Letters*, 2011, 14(8): 788-796.
- [33] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 唐清亮, 高培, 王永东. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征. *生态学报*, 2013, 33(18): 5760-5767.
- [34] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 安申群. 塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(24): 8326-8335.
- [35] 苏原, 罗艳, 耿凤展, 韩文轩, 朱玉梅, 李凯辉, 刘学军. 天山高寒草原植物叶片氮磷化学计量特征对氮沉降的响应. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 430-436.
- [36] 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. *草业学报*, 2018, 27(12): 94-102.
- [37] 杨勇, 刘爱军, 李兰花, 陈海军, 宋向阳, 王保林, 罗冬, 王明玖. 围封对内蒙古典型草原群落特征及土壤性状的影响. *草业学报*, 2016, 25(5): 21-29.
- [38] 戚德辉, 温仲明, 王红霞, 郭茹, 杨士梭. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应. *生态学报*, 2016, 36(20): 6420-6430.