

DOI: 10.5846/stxb202006051464

张旭冉, 张卫青, 王海茹, 卢晓霞, 春风, 赛西雅拉图. 克氏针茅草原土壤生态化学计量特征对放牧强度的响应. 生态学报, 2021, 41(13): 5309-5316.

Zhang X R, Zhang W Q, Wang H R, Lu X X, Chun F, Sai Xiyalatu. Response of soil ecological stoichiometric characteristics to grazing intensity in *Stipa kirschnii* grassland. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5309-5316.

克氏针茅草原土壤生态化学计量特征对放牧强度的响应

张旭冉, 张卫青*, 王海茹, 卢晓霞, 春风, 赛西雅拉图

内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010020

摘要:生态化学计量学是研究生态系统中各元素间平衡的科学, 对于探究土壤有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)元素循环以及土壤养分限制状况具有重要意义。为了解克氏针茅(*Stipa kirschnii*)草原土壤生态化学计量特征, 以内蒙古克氏针茅草原区为研究对象, 在不同放牧强度草场进行采样分析。结果表明: 随着放牧强度的增加, C、P 含量先降低后升高, N 含量先升高后降低; 土壤 C/N 先降低后升高、C/P 逐渐升高、N/P 先升高后降低。C/N 随着放牧强度的增加与有机碳相关性逐渐增大、与全氮的相关性逐渐减小; 轻牧区的 C/P 受有机碳作用有所增强; 中牧区 N/P 受全氮作用增强。C/N 主要限制因素是有机碳含量, C/P 和 N/P 主要限制因素是全磷含量。不同放牧强度会影响土壤化学计量比与其他物质的关系, 也会改变土壤化学计量比各制约因素的强度。

关键词:土壤; 生态化学计量; 放牧强度; 克氏针茅草原

Response of soil ecological stoichiometric characteristics to grazing intensity in *Stipa kirschnii* grassland

ZHANG Xuran, ZHANG Weiqing*, WANG Hairu, LU Xiaoxia, CHUN Feng, SAI Xiyalatu

College of Geographic Science, Inner Mongolian Normal University, Hohhot 010022, China

Abstract: Ecochemometrics aims to study the balance of various elements in an ecosystem, which is of great significance to the exploration of soil organic carbon (C), total nitrogen (N), total phosphorus (P) element cycle, and soil nutrient limitation. In order to understand the soil ecological stoichiometric characteristics of *Stipa kirschnii* grassland, this paper took *Stipa kirschnii* grassland in Inner Mongolia as the research object, and conducted sampling analysis in pastures with different grazing intensities. The results showed that with the increase of grazing intensity, the content of C and P first decreased and then increased, and the content of N first increased and then decreased. Soil C/N first decreased and then increased, C/P gradually increased, and N/P first increased and then decreased. With the increase of grazing intensity, the correlation between C/N and organic carbon increased gradually, while the correlation between C/N and total nitrogen decreased gradually. The C/P of light pastoral area was enhanced by organic carbon. N/P in the middle pastoral area was enhanced by total nitrogen. The main limiting factor of C/N is organic carbon content, while the main limiting factor of C/P and N/P is total phosphorus content. Different grazing intensities will affect the relationship between soil stoichiometric ratio and other substances, and also change the strength of each limiting factor of soil stoichiometric ratio.

基金项目:国家自然科学基金(41561050); 内蒙古自然科学基金(2020MS04002, 2018MS04010); 内蒙古师范大学研究生科研创新基金项目(CXJJS19145)

收稿日期: 2020-06-05; 网络出版日期: 2021-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zwq@imnu.edu.cn

Key Words: soil; ecological stoichiometry; grazing intensity; *Stipa kirschnii* grassland

生态化学计量学是研究生态系统中各元素间平衡的科学,可以依据土壤有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)等营养元素之间的关系来研究区域养分的平衡性^[1-5]。C、N、P 是植物能量的重要来源以及植物生长的基本营养元素,参与植物的物质循环和能量流动^[6-7]。不同的气候、植被、水文等因素通过影响土壤元素而改变了土壤化学计量特征^[8-9],生态化学计量常被用来研究植物叶片、凋落物和土壤中的 C、N、P 元素及元素之间的关系。

草地在世界上分布极其广泛,占陆地表面面积的 40%,放牧是人类利用草地最显著的方式之一^[10]。对于草地而言,生态化学计量学有助于从元素循环、能量平衡等角度阐述草地生态系统的运行规律。我国草地化学计量特征受 CO₂ 浓度升高、全球变暖、陆地风速下降、大气全氮沉降、土地利用变化等影响,其时空变异特征明显^[11]。针对不同区域化学计量特征的研究很多^[12-17],对草地生态化学计量特征的研究主要集中于青藏高原和内蒙古高原,少数集中在黄土高原、云贵高原和三江平原地区。例如,有研究发现宁夏典型草原 C/N 接近我国土壤均值,C/P 和 N/P 低于我国土壤均值;荒漠草原 C/N、C/P 随土层深度降低,C/N、C/P、N/P 随放牧强度发生增减^[18-20]。而东北地区表层 C/N 随放牧强度增加而降低,且各比值也远低于我国土壤计量比均值^[21-22]。在青藏高寒地区 C/N、N/P 随土层加深逐渐降低;当放牧强度发生改变时,N、P 周转被限制,放牧的 C/P 低于围封草地^[23-24]。方昕在滇西北高原区发现放牧使土壤生态化学计量逐渐降低^[25]。牛得草^[26]研究发现长芒草叶片中 C/N 和 C/P 小于围封草地。吴雨晴^[27]通过研究内蒙古呼伦贝尔草原发现常牧区与禁牧区 C/P 和 N/P 有差异。贾丽欣^[28]通过研究内蒙古荒漠草原发现无芒隐子草叶片 C/N 随放牧强度增加而降低。据此,以往许多研究是针对不同类型草原土壤、植物的生态化学计量特征展开,但结果有所不同,并且针对内蒙古克氏针茅草原区不同放牧强度下土壤生态化学计量特征的研究还未深入。

本研究以内蒙古克氏针茅草原为研究区域,选取不同放牧强度下草场土壤进行采样。旨在解决以下问题:(1)分析不同放牧强度下土壤基本性质和土壤生态化学计量比特征。(2)探究不同放牧强度下土壤生态化学计量比与土壤 C、N、P 间的关系。(3)寻找不同放牧强度下对土壤生态化学计量比制约性最强的指标。从而了解土壤生态化学计量特征对放牧强度的响应情况,为草地土壤养分研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古阿巴嘎旗那仁宝拉格苏木(44°35′—44°57′N,113°55′—114°15′E),地处锡林郭勒波状高平原北部,地形为低山丘陵区,地势由东北向西南倾斜,海拔 1240—1483 m。气候属于中温带半干旱大陆性气候,春季干旱多风、夏季温热、秋季凉爽、冬季寒冷。年平均温度为 0.6℃,年平均降水量为 223.56 mm,年平均蒸发量为 1896.3 mm。土壤为暗栗钙土和淡栗钙土,植物建群种以克氏针茅(*Stipa krylovii*)为主。研究区长期实行游牧业生产,自 1996 年实行“畜草双承包”制,形成了网围栏定居放牧管理,至今已经近 30 年。由于牲畜增多,草场发生不同程度退化。

1.2 试验设计和野外采样

在研究区选择地势相对平坦的 3 个家庭草场,自 2003 年至今,各草场放牧牲畜的数量和结构较为稳定。依据每个草场单位面积牲畜头数,形成了 3 个放牧强度:0.34、0.69、1.53(羊单位/hm²),分别代表轻度放牧(轻牧)、中度放牧(中牧)、重度放牧(重牧),并以 2001 年禁牧管理(0 羊单位/hm²)的草场为对照(表 1)。草场面积为轻牧 1258 hm²、中牧 835 hm²、重牧 510 hm²以及禁牧 310 hm²。草场自北向南排列分别为轻牧、禁牧、重牧和中牧,相邻两个草场之间相距 18—50 km。以牧户草场为采样区,每个样区随机选取五个样点,共 20 个样点。每个样点挖掘 30 cm×30 cm×30 cm 剖面,用环刀依次在 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 土层进行取样,同时在每层取散土装入密封袋中,带回实验室。所有样品于 2019 年 8 月采集。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic information of the samples

样地类型 Sample type	草场面积 Pasture area/hm ²	海拔高度 Altitude/m	样点数 Sample points	主要优势植物 Major dominant plant
禁牧 No grazing	310	1330	5	克氏针茅(<i>Stipa krylovii</i>)、羊草(<i>Leymus chinensis</i>)
轻牧 Light grazing	1258	1337	5	克氏针茅(<i>Stipa krylovii</i>)、羊草(<i>Leymus chinensis</i>)
中牧 Moderate grazing	835	1319	5	冷蒿(<i>A. frigida</i> Willd)、隐子草(<i>Cleistogenes</i>)、多根葱(<i>Allium poryrhizum</i>)、灰绿藜(<i>Chenopodium glaucum</i>)
重牧 Heavy grazing	510	1297	5	萎陵菜属(<i>Potentilla</i>)、银灰旋花(<i>Convolvulus ammannii</i>)、寸苔草(<i>Carex duriuscula</i>)

1.3 样品测定

土壤有机碳:重铬酸钾—外加热法;土壤酸碱值(pH):电位测定法;土壤容重:环刀法;土壤全氮:凯氏定氮法;土壤全磷:钼锑抗比色法;土壤含水量:烘干法^[29]。

1.4 数据处理

利用 SPSS 软件分析不同强度或不同深度对克氏针茅草原土壤基本性质和化学计量比的影响(One-way ANOVA),运用 Pearson Correlation 分析化学计量比与土壤 C、N、P 的相关性,采用一元线性回归模型分析化学计量比与土壤 C、N、P 的拟合状态;运用 Origin 9.1 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤基本性质

通过分析研究区 0—30 cm 土壤基本性质发现(表 2),有机碳、全氮、全磷含量平均值分别为:11.78、0.92、0.18 g/kg。pH、容重、含水量平均值为:7.49、1.28 g/cm³、10.59%。其中,有机碳、全氮、全磷、含水量属于中等变异(24.74%—31.86%);pH、容重属于弱变异(5.63%—7.68%)。

表 2 研究区土壤性质
Table 2 Soil properties of the study area

指标 Index	有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	全氮 Total nitrogen/(g/kg)	全磷 Total phosphorus/(g/kg)	pH	容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	含水量 Water content/%
平均值 Mean	11.78	0.92	0.18	7.49	1.28	10.59
最大值 Maximum	19.94	1.30	0.33	8.21	1.45	18.58
最小值 Minimum	7.04	0.55	0.09	6.54	1.10	6.29
标准差 Standard deviation	3.19	0.23	0.07	0.42	0.10	3.52
变异系数 Variable coefficient	27.04%	24.74%	37.98%	5.63%	7.68%	31.86%

由图 1 可知,随着放牧强度的增加,土壤有机碳和容重先减少后增加,重牧显著高于其他处理($P<0.05$),而其他处理之间无显著性差异;全氮含量先增加后减少,全磷含量先减少后增加,全氮、全磷和 pH 在各处理间没有显著性差异;含水量逐渐减少,轻牧显著高于禁牧和重牧($P<0.05$)。

2.2 不同放牧强度下土壤 C、N、P 计量比特征

由图 2 可知,随着放牧强度的增大,C/N 在 0—10 cm、10—20 cm 先减少后增加,20—30 cm 逐渐增加;0—10 cm 处,重牧与禁牧、中牧相比显著增加($P<0.05$);10—20 cm 处重牧显著高于中牧($P<0.05$)。在 0—30 cm,C/N 先减少后增加,重牧显著高于其他区域($P<0.05$)。C/P 在 0—10 cm 先增加后减少;10—20 cm 先减少后增加;20—30 cm 逐渐增加,所有区域差异均不显著。在 0—30 cm,C/P 逐渐增加,各区域间无显著性差异。N/P 在各土层中均呈现先增加后减少的趋势,且 0—10 cm 和 0—30 cm,中牧显著高于轻牧和重牧($P<0.05$)。可见,重牧对 C/N、C/P 影响程度最大,中牧主要影响 N/P。

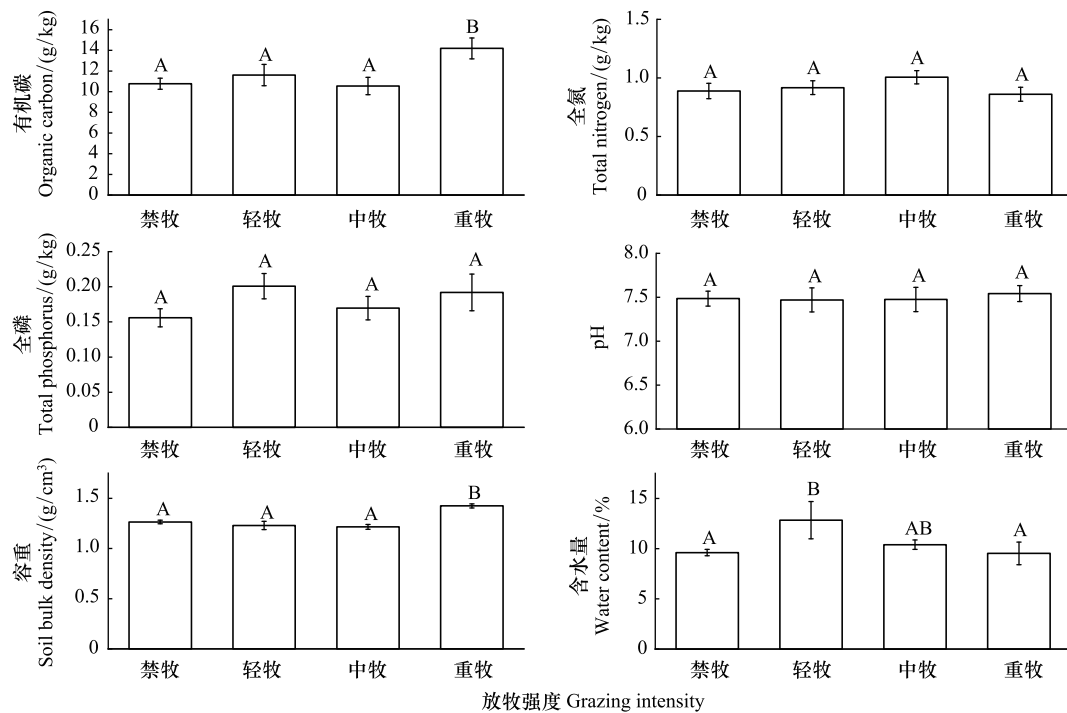


图1 不同放牧强度下土壤基本性质

Fig.1 Soil basic properties under different grazing intensities

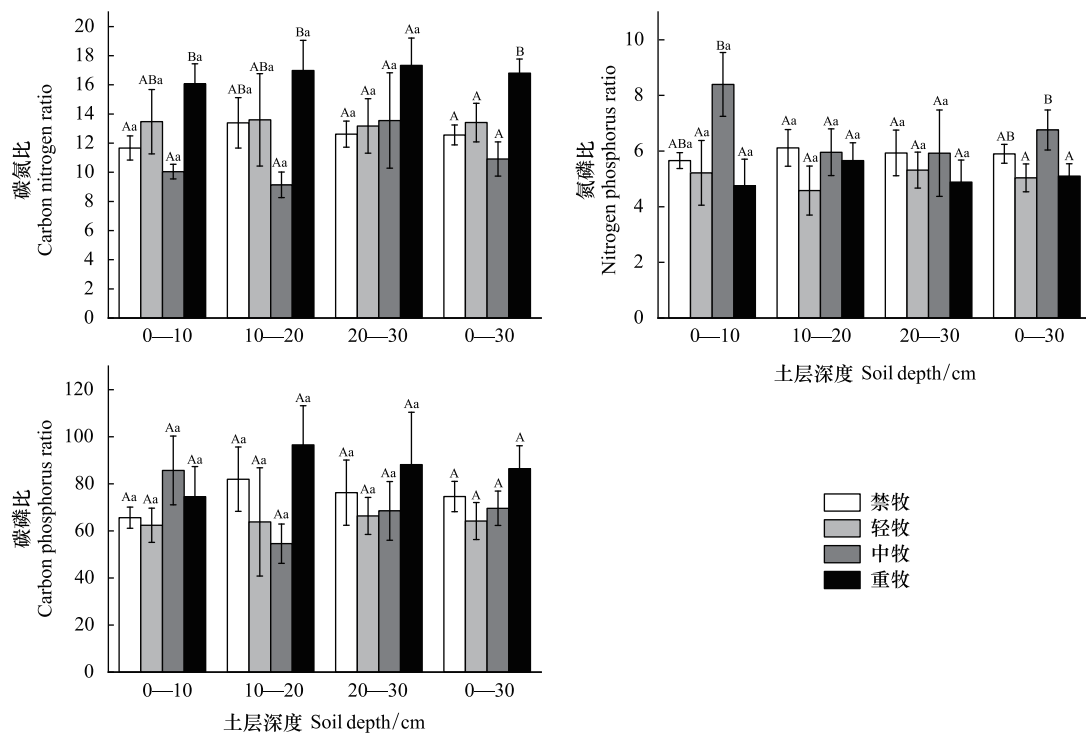
图中不同大写字母代表放牧强度间差异显著 ($P < 0.05$)

图2 不同放牧强度下土壤化学计量比特征

Fig.2 Characteristics of soil stoichiometric ratio under different grazing intensities

图中不同大写字母代表放牧强度间差异显著,不同小写字母代表同一强度不同土层差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 土壤化学计量比与土壤 C、N、P 的关系

由表 3 可知,在禁牧区中,C/N、C/P、N/P 均与 P 呈显著负相关($P<0.05$),且 C/N 与 N 也呈显著负相关($P<0.05$)。在轻牧区中,C/N 与 C 呈显著正相关性($P<0.01$),与 N 呈显著负相关性($P<0.05$);C/P 与 C 呈显著正相关性($P<0.01$),与 P 呈显著负相关($P<0.01$);N/P 与 N 呈显著正相关性($P<0.05$),与 P 呈显著负相关性($P<0.01$)。在中牧区中,C/N 与 C 呈显著正相关性($P<0.01$);C/P 与 P 呈显著负相关($P<0.01$);N/P 与 N 呈显著正相关($P<0.01$);与 P 呈显著负相关($P<0.01$)。在重牧区中,C/N 与土壤 C、N、P 无显著相关性;C/P 和 N/P 与 P 呈显著负相关($P<0.01$)。

表 3 土壤化学计量比与基本性质的相关性

Table 3 Correlation between soil stoichiometric ratio and basic properties

放牧强度 Grazing intensity	指标 Index	碳氮比 Carbon nitrogen ratio	碳磷比 Carbon phosphorus ratio	氮磷比 Nitrogen phosphorus ratio
禁牧 No grazing	有机碳	0.212	0.310	0.309
	全氮	-0.633 *	-0.333	0.157
	全磷	-0.609 *	-0.751 **	-0.515 *
轻牧 Light grazing	有机碳	0.723 **	0.718 **	-0.023
	全氮	-0.625 *	-0.081	0.529 *
	全磷	-0.089	-0.646 **	-0.749 **
中牧 Moderate grazing	有机碳	0.810 **	0.463	0.096
	全氮	-0.456	0.370	0.641 **
	全磷	0.364	-0.733 **	-0.837 **
重牧 Heavy grazing	有机碳	0.446	0.266	0.059
	全氮	-0.320	-0.198	0.012
	全磷	-0.231	-0.675 **	-0.730 **

** 表示在 0.01 水平上极显著相关($P<0.01$), * 表示在 0.05 水平上显著相关($P<0.01$)

由图 3 可知,各计量比与 C、N、P 间存在线性关系。C/N 与 C 的拟合方程为 $y=0.8606x+3.2835$,与 N 拟合方程为 $y=-9.9731x+22.5757$ ($n=60, P<0.05$);拟合强度为:C>N。C/P 与 C 的拟合方程为 $y=4.061x+25.8508$,与 P 的拟合方程为 $y=-267.4963x+121.8335$ ($n=60, P<0.05$);拟合强度为:P>C。N/P 与 N 的拟合方程为 $y=3.2538x+2.6438$,与 P 的拟合方程为 $y=-19.4916x+9.2071$ ($n=60, P<0.05$);拟合强度为:P>N。

3 讨论

3.1 不同放牧强度下土壤 C、N、P 特征

土壤有机碳、全氮、全磷通过在生态系统中的循环与平衡,对植物的生长发育起到了重要的作用^[30]。本研究中,随着放牧强度的增加,C、P 含量先降低后升高,这与吴雨晴^[27]、安钰^[19]的研究结果不同;与张婷^[21]的研究结果相同。N 含量先升高后降低,这与闫瑞瑞^[31]、贾丽欣^[28]的研究结果相同;并且,重牧区 C 富集较多。这可能是因为随着强度的变化,植物被采食量上升,导致 C、P 消耗加快,但重牧区由于牲畜排泄等因素,经过长时间的积累,使 C、P 元素富集^[32-33]。N 受到生物量、微生物呼吸等因素^[34]的影响,加上各草场强度的变化,使土壤结构发生改变,导致土壤微生物呼吸受到限制,降低了 N 的富集,加大了 N 由于牲畜采食所引起的损耗。随着牲畜对地上生物量的采食和土壤的挤压,导致植物残留和土壤微生物发生改变,进而影响 C、N、P 含量。土壤 C、N、P 的变化分为两个阶段:一个阶段是放牧可能通过增加不适口的植物种类而减少营养循环;另一个阶段是放牧过程使新鲜植物凋落物和动物排泄物输入到土壤中刺激微生物活动,增加营养循环^[35]。当然,C、N、P 的变化也与放牧时间有关,我们所选取的草场在每年夏季进行放牧,由于夏季草场正处于植物生长季,对土壤养分的需求量变大,且牲畜采食对植物本身生长产生一定影响,使植物回归土壤的生物量减少,对土壤养分补充减少。在这样的影响下,经过多年的持续扰动,改变了土壤养分含量。土壤含水量逐

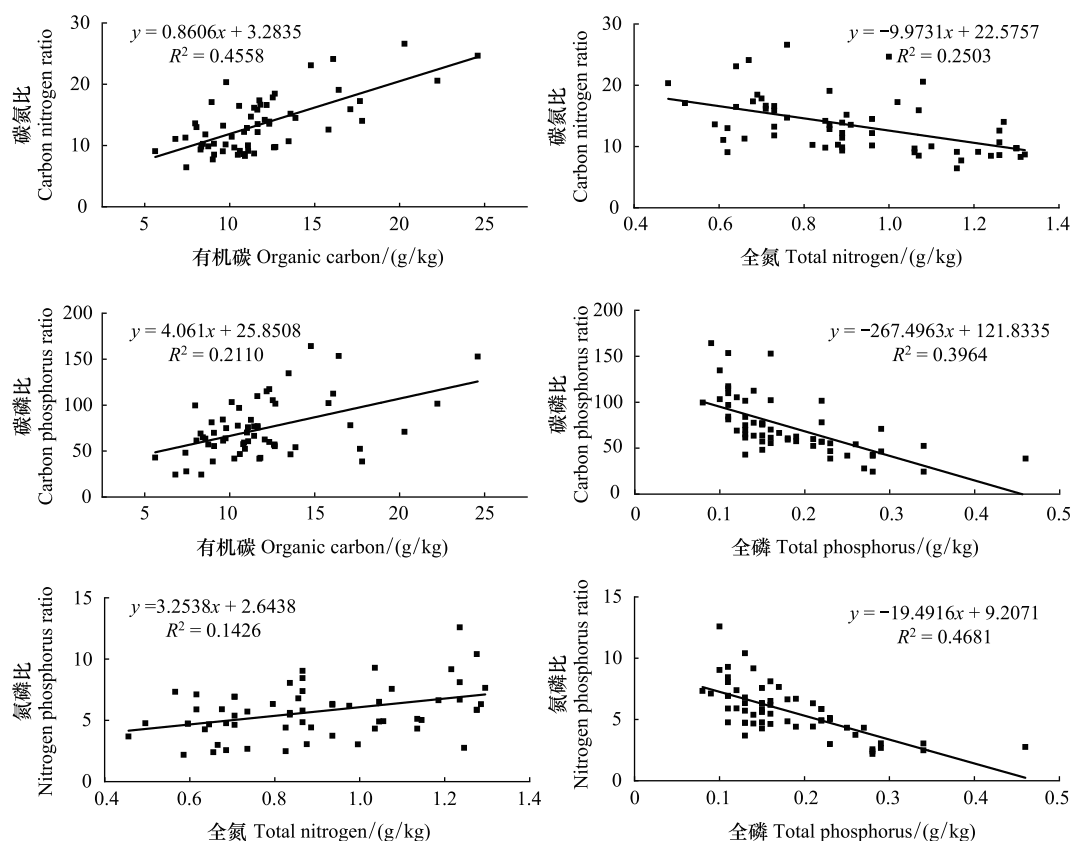


图3 土壤化学计量比与 C、N、P 的拟合关系

Fig.3 Fitting relationship between soil stoichiometric ratio and C, N and P

渐减小,这与方昕^[25]的研究结果相同,容重先减少后增大。这是由于放牧压力的提升,使土壤紧实,改变了土壤孔隙,使土壤水汽循环减弱,含水量减少,容重增加。总之,土壤 C、N、P 的富集和损耗受植物生物量、微生物以及土壤结构的影响。

3.2 不同放牧强度下土壤 C、N、P 计量比特征

土壤 C、N、P 化学计量特征是表征土壤 C、N、P 平衡的重要指标^[33]。C/N 可以作为 N 矿化能力的指标^[36-37]。C/N 在 0—10 cm 和 10—20 cm 重牧区改变最大,这与青焱^[23]、吴雨晴^[27]的研究结果相同。且高于全球平均值和全国平均值^[38]。这可能是由于该区域土壤有机碳素和全氮素具有极高的相关性^[39],二者间变化一致,使 C/N 维持在一个较为稳定的范围。在重牧区,对土壤有机碳、全氮消耗加大,牲畜排泄物较多,经过长时间累积作用导致二者与其他区域相比呈现极其高的变化特征。C/P 是指示土壤磷素矿化的标志,C/P 低代表土壤矿化能力高^[40]。本研究随强度的增加 C/P 逐渐增加,但与禁牧相比轻牧和中牧有所减少,且高于全国平均值^[38],这与吴雨晴^[27]、安钰^[19]的研究结果相同。这是由于土壤有机碳和全磷随着放牧强度有所增加,但是二者变化幅度不同,导致其比值发生变化。N/P 可以体现 N、P 限制性作用以及确定养分限制的阈值^[41]。有着改变微生物群落、指示土壤养分状况的作用^[42],本研究 N/P 随强度先增加后减少,这与安钰^[19]的研究结果相同,且低于全球、全国平均值^[43-44]。说明中度放牧下 N/P 峰值最大,适宜的放牧强度使养分循环达到最佳水平,有利于微生物多样性和养分积累。并且以往研究表明,优势种和植物官能团组成变化是引起生态化学计量变化的关键机制^[35]。

3.3 不同放牧强度下土壤计量比与 C、N、P 的关系

本研究中随着放牧强度由弱到强,各物质间的关系发生变化。C/N 在禁牧区与有机碳、全氮间呈显著性相关($P < 0.05$);轻牧区与有机碳相关性加强;中牧区与全氮相关性减弱,到达重牧时,所有物质与 C/N 的相关

性均不显著。且 C/N 与 C、N 的拟合强度为:有机碳>全氮。这是由于长期的高放牧强度对草场进行干扰,土壤各元素的变化在多年后发生较大的差异,导致其与 C/N 之间的关系发生变化,特别是有机碳与 C/N 的关系。C/P 在禁牧与全磷显著性相关($P<0.05$);轻牧与有机碳、全磷显著相关($P<0.05$);中、重牧与全磷显著相关($P<0.05$)。且 C/P 与 C、P 的拟合强度为:全磷>有机碳。这说明 C/P 在不同的强度下,起主导作用的一直是全磷,有机碳对 C/P 的影响小于全磷。N/P 禁牧与全磷显著相关($P<0.05$);轻牧与全氮、全磷显著相关($P<0.05$);中牧全氮、全磷显著相关($P<0.05$);重牧全磷显著相关($P<0.05$),且 N/P 与 N、P 的拟合强度为:全磷>全氮。这说明 N/P 的制约因素不会随着放牧强度的变化而改变,而全氮、全磷都是 N/P 影响最为密切的物质。但根据线性拟合,全磷的作用比全氮强。也有研究发现,放牧对 C、N、P 化学计量特征的影响受到降水的强烈调节^[35]。

4 结论

随着放牧强度的增加,C、P 含量先降低后升高,N 含量先升高后降低,放牧对营养元素具有消耗和富集的作用。土壤 C/N 先降低后升高、C/P 逐渐升高、N/P 先升高后降低,重度放牧对 N/P 影响最强。在 C/N 变化中,与有机碳相关性逐渐增大、与全氮的相关性逐渐减小,到达重牧时,所有物质与 C/N 的相关性均不显著;在 C/P 变化中,全磷起主要作用,但轻牧区的 C/P 受有机碳作用有所增强。在 N/P 变化中,全磷有着重要的作用,中牧下全氮作用增强。C/N 主要限制因素是有机碳含量,C/P 和 N/P 主要限制因素是全磷含量。放牧会影响土壤化学计量比与其他物质的关系,也会改变土壤化学计量比各个制约因素的强度。

参考文献 (References):

- [1] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [2] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [3] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L W. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.
- [4] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.
- [5] Tian D, Yan Z B, Niklas K J, Han W X, Kattge J, Reich P B, Luo Y K, Chen Y H, Tang Z Y, Hu H F, Wright I J, Schmid B, Fang J Y. Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent. National Science Review, 2018, 5(5): 728-739.
- [6] Liu Y, Jiang M, Lu X G, Lou Y J, Liu B. Carbon, nitrogen and phosphorus contents of wetland soils in relation to environment factors in Northeast China. Wetlands, 2017, 37(1): 153-161.
- [7] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 王维奇, 王纯. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [8] Xu H W, Qu Q, Li P, Guo Z Q, Wulan E, Xue S. Stocks and stoichiometry of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus after vegetation restoration in the loess hilly region, China. Forests, 2019, 10(1): 27.
- [9] Xue H L, Lan X, Liang H G, Zhang Q. Characteristics and environmental factors of stoichiometric homeostasis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in China. Sustainability, 2019, 11(10): 2804.
- [10] 王芳芳, 徐欢, 李婷, 伍星. 放牧对草地土壤氮素循环关键过程的影响与机制研究进展. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3277-3284.
- [11] 刘文亭, 卫智军, 吕世杰, 孙世贤. 中国草原生态化学计量学研究进展. 草地学报, 2015, 23(5): 914-926.
- [12] 刘冬, 张剑, 包雅兰, 赵海燕, 陈涛. 水分对敦煌阳关湿地芦苇叶片与土壤 C、N、P 生态化学计量特征的影响. 生态学报, 2020, 40(11): 3804-3812.
- [13] 郭二辉, 方晓, 马丽, 杨小燕, 杨喜田. 河岸带农田不同恢复年限对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响——以温榆河为例. 生态学报, 2020, 40(11): 3785-3794.
- [14] 高丽倩, 赵允格, 许明祥, 孙会, 杨巧云. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响. 生态学报, 2018, 38(2): 678-688.
- [15] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 杜海伦, 张雄清, 郭文福, 孙建军. 广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2020, 40(4): 1207-1218.
- [16] 蓝芙宁, 李衍青, 赵一, 朱同彬, 蒋忠诚, 吴华英, 朱秀群, 侯士田. 放牧对峰丛洼地植物—土壤 C、N、P 化学计量特征的影响. 中国岩溶, 2018, 37(5): 742-751.

- [17] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 方瑛, 马任甜. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征. 土壤学报, 2016, 53(6): 1541-1551.
- [18] 饶丽仙, 沈艳, 聂明鹤. 宁夏典型草原不同退耕年限草地植物-土壤生态化学计量特征. 草业学报, 2017, 26(4): 43-52.
- [19] 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.
- [20] 杨阳, 刘秉儒, 杨新国, 韩丛丛. 荒漠草原中不同密度人工柠条灌丛土壤化学计量特征. 水土保持通报, 2014, 34(5): 67-73.
- [21] 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.
- [22] 李晴宇, 李月芬, 王冬艳, 郭冬艳, 赵一赢. 基于生态化学计量学的土壤-植物系统在退化草地群落演替中的养分响应. 吉林农业大学学报, 2016, 38(6): 693-702.
- [23] 青烨, 孙飞达, 李勇, 陈文业, 李昕. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析. 草业学报, 2015, 24(3): 38-47.
- [24] 许雪赞, 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. 生态学报, 2018, 37(5): 1349-1355.
- [25] 方昕, 郭雪莲, 郑荣波, 付倩. 不同放牧干扰对滇西北高原泥炭沼泽土壤生态化学计量特征的影响. 水土保持研究, 2020, 27(2): 9-14.
- [26] 牛得草, 董晓玉, 傅华. 长芒草不同季节碳氮磷生态化学计量特征. 草业科学, 2011, 28(6): 915-920.
- [27] 吴雨晴, 田赞, 周建琴, 张克斌. 不同放牧制度草地土壤碳氮磷化学计量特征. 应用与环境生物学报, 2019, 25(4): 801-807.
- [28] 贾丽欣, 张峰, 乔芙蓉, 杨阳, 赵天启, 郑佳华, 李梦然, 张昊, 赵萌莉. 放牧强度对荒漠草原无芒隐子草斑块碳氮化学计量特征的影响. 中国草地学报, 2019, 41(1): 9-16, 93.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 31-165.
- [30] Shen F F, Wu J P, Fan H B, Liu W F, Guo X M, Duan H L, Hu L, Lei X M, Wei X H. Soil N/P and C/P ratio regulate the responses of soil microbial community composition and enzyme activities in a long-term nitrogen loaded Chinese fir forest. Plant and Soil, 2019, 436(1/2): 91-107.
- [31] 闫瑞瑞, 辛晓平, 王旭, 闫玉春, 邓钰, 杨桂霞. 不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应. 生态学报, 2014, 34(6): 1587-1595.
- [32] 刘新民, 陈海燕, 峥嵘, 乌云, 阿仁高娃, 王润润. 内蒙古典型草原羊粪和牛粪的分解特征. 应用与环境生物学报, 2011, 17(6): 791-796.
- [33] 刘忠宽, 汪诗平, 韩建国, 陈佐忠, 王艳芬. 放牧家畜排泄物 N 转化研究进展. 生态学报, 2004, 24(4): 775-783.
- [34] Lu Q Q, Bai J H, Zhang G L, Zhao Q Q, Wu J J. Spatial and seasonal distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur and their ecological stoichiometry in wetland soils along a water and salt gradient in the Yellow River Delta, China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2018, 104: 9-17.
- [35] 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.
- [36] 王振, 王子煜, 韩清芳, 李文静, 韩丽娜, 丁瑞霞, 贾志宽, 杨宝平. 黄土高原苜蓿草地土壤碳、氮变化特征研究. 草地学报, 2013, 21(6): 1073-1079.
- [37] 张良侠, 樊江文, 张文彦, 唐风沛. 京津风沙源治理工程对草地土壤有机碳库的影响——以内蒙古锡林郭勒盟为例. 应用生态学报, 2014, 25(2): 374-380.
- [38] 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.
- [39] 张旭冉, 张卫青, 乌日查呼, 李晓佳, 赛西雅拉图, 春风. 克氏针茅草原区有机碳与土壤理化性质的关系. 干旱区资源与环境, 2020, 34(8): 194-199.
- [40] 吴建国, 韩梅, 裴伟, 艾丽, 常学向. 祁连山中部高寒草甸土壤氮矿化及其影响因素研究. 草业学报, 2007, 16(6): 39-46.
- [41] Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven J T A. Biomass N: P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands. Ecological Applications, 2003, 13(2): 372-384.
- [42] 邬畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展. 中国沙漠, 2010, 30(2): 296-302.
- [43] 张剑, 宿力, 王利平, 包雅兰, 陆静雯, 高雪莉, 陈涛, 曹建军. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响——以敦煌阳关湿地为例. 生态学报, 2019, 39(2): 580-589.
- [44] Yuan Z Y, Chen H Y H, Reich P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus. Nature Communications, 2011, 2: 344.