

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2021.11.021

放牧强度对黄土丘陵区生物结皮土壤化学计量学特征的影响

李 雯¹, 马昕昕², 马 宁³, 赵允格^{2*}, 乔 羽¹, 王 鹏², 孙 会³

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:研究以位于黄土丘陵区的固原、定边、神木、安塞为研究区域,以各区 20 年以上封禁草地(G0)为对照,分析了不同放牧强度(以羊粪球密度计:G1,0~10 个·m⁻²;G2,10~20 个·m⁻²;G3,>20 个·m⁻²)下生物结皮层及 0~2 cm 土层土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及生态化学计量学特征。结果表明:放牧仅降低安塞藓结皮盖度,对各地区的藻结皮盖度和生物量均无影响;从各区域来看,除神木生物结皮层和 0~2 cm 土层 SOC、TN、N:P、C:P 在 G3 降低以外,其余地区各放牧强度下 SOC、TN、TP 含量及 C:N、N:P、C:P 无降低现象;总体来看,各强度放牧对生物结皮层 SOC、TN、TP 含量及 C:N、N:P、C:P 无影响,对 0~2 cm 土层 SOC、TN、TP 含量及 C:N 无影响,而 N:P、C:P 在 G3 降低。综上,放牧强度小于 G3 时,黄土丘陵区退耕草地生物结皮土壤养分及生态化学计量学特征无降低现象。

关键词:生物结皮;放牧强度;化学计量;碳、氮、磷;养分限制

中图分类号:S54

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2021)11-2547-09

Effects of Grazing Intensity on Stoichiometry of Biological Soil Crusts in the Hilly Loess Plateau region

LI wen¹, MA Xin-xin², MA Ning³, ZHAO Yun-ge^{2*}, QIAO Yu¹, WANG Peng², SUN Hui³

(1. College of Nature Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

Abstract: Guyuan, Dingbian, Shenmu and Ansai were selected as the study areas in the hilly Loess Plateau region. The closed rehabilitated grasslands (G0) that over 20 years old was set as the control, the effects of grazing in different intensity on soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) contents and ecological stoichiometry characteristics of biocrusts at 0~2 cm layer soil were investigated in the rehabilitated grasslands of the hilly Loess Plateau region. Three grazing intensity, G1: 0~10 goat dung·m⁻², G2: 10~20 goat dung·m⁻² and G3: >20 goat dung·m⁻², were included in the study. The results showed that the coverage of moss crusts decreased against the increase of grazing intensity in Ansai. In addition, grazing intensity did not exert significant effects on the coverage and biomass of cyanobacterial and moss crusts in the three other study areas. SOC, TN, N:P and C:P decreased under the intensity of G3 in Shenmu. Moreover, SOC, TN, TP, C:N, N:P and C:P did not show an obvious decrease under different grazing intensities in the three other areas. In general, grazing did not significantly affect the contents of SOC, TN, TP, C:N, N:P and C:P at the biocrustal layer in the hilly Loess Plateau region, and did not significantly affect the contents of SOC, TN, TP and C:N at 0~2 cm soil layer, but in comparison with no grazing, N:P and C:P were decreased at G3. In conclusion, when the grazing intensity was lower than G3, the soil nutrient and ecological stoichiometry characteristics of biological soil crusts were not reduced in the rehabilitated grassland of the hilly loess region.

Key words: Biological soil crusts; Grazing intensity; Stoichiometry; Carbon, nitrogen, phosphorus; Nutrient limitation

收稿日期:2021-06-15;修回日期:2021-08-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41830758,41771318)和中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项(2019)资助

作者简介:李雯(1997-),女,硕士研究生,主要从事生物结皮研究,E-mail:liwen8862@163.com; *通讯作者 Corresponding author, E-mail:zyunge@ms.iswc.ac.cn

草地作为陆地生态系统的重要组成部分,在调节气候、水土保持、养分循环等方面具有重要生态学意义^[1]。黄土丘陵区是我国乃至世界水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区之一,自上世纪 90 年代末期退耕还林(草)工程实施以来,该区退耕草地植被得以逐渐恢复^[2]。放牧在该区的社会经济及文化活动中占有不可或缺的位置。放牧可通过动物踩踏、觅食以及排泄物归还等影响草地的植被和枯落物盖度、土壤理化属性、土壤侵蚀及流失^[1,3-4],进而影响土壤养分含量。目前,关于放牧强度对土壤养分影响的研究在全球范围内均有涉及,但研究结果仍有争议。如 Reeder 等^[5]在美国研究表明,重度放牧可增加土壤有机质含量;李香真和陈佐忠^[6]在内蒙古草原研究表明过度放牧降低了土壤有机质和全氮的含量,轻牧和中牧对养分含量影响不大;而 Milchunas 和 Lauenroth^[7]对全球 236 个试验点研究表明土壤养分与放牧强度关系复杂,受诸多因素影响,包括植被和土壤的初始情况,环境因素和放牧历史。

生物土壤结皮(Biological soil crusts,简称生物结皮)是由隐花植物,如蓝藻、地衣、苔藓类和土壤中的微生物以及其他相关生物体通过菌丝体、假根系和分泌物等与土壤表层的颗粒物胶结而形成的复杂复合体,是干旱、半干旱地区健康生态系统中广泛分布的生物地被物^[8]。目前,生物结皮在黄土丘陵区退耕草地覆盖度可达 60%~70%^[9],甚至更高,其作为生态系统中物质和能量交换的关键界面层,可从多方面改变土壤的理化属性,如增加土壤稳定性^[10]和养分^[8,9]、减轻和降低水土流失和土壤侵蚀^[11],改善土壤水分状况^[12]等。放牧作为影响生物结皮理化性质的关键因素,鲜有研究报道。杨巧云^[13]在黄土丘陵区模拟羊蹄干扰研究发现,干扰显著降低了生物结皮层的有机碳(SOC)、全氮(TN),而对全磷(TP)无明显影响,但该研究并未考虑实际放牧过程中动物的选择性采食和动物排泄物的输入。

生态化学计量学作为研究生态系统中各种元素和能量平衡关系的学科,被广泛应用于揭示各元素在生态系统中的耦合关系,其中碳(C)、氮(N)、磷(P)是生物有机体内最主要的大量元素,通过对 C、N、P 等元素之间的计量比,可以更好地分析它们之间的养分限制类型及平衡关系^[14],为研究生态系统平衡提供了有力的框架。目前,已有大量关于放牧对土壤生态化学计量学特征的研究^[14-16],然而基于放牧强度对生物结皮土壤生态化学计量学特征的研究报道较少。当前,放牧强度对生物结皮土壤养分

及化学计量学特征的影响尚不清楚,是生物结皮及其生态功能研究中的薄弱环节,妨碍了人们对干旱半干旱地区草地生态系统生物结皮的科学管理。

为此,本文以黄土丘陵区 4 个地区典型撂荒草地为研究对象,通过测定不同强度放牧条件下的生物结皮层及下层土壤理化性质、生态化学计量学特征,研究放牧对黄土丘陵区生物结皮土壤生态化学计量学特征的影响,以期为黄土丘陵区退耕草地土壤养分管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黄土丘陵区位于我国中部偏北,坡度为 10~35°,气候主要是大陆性季风气候,从东南向西北,降雨和温度呈现出明显的梯度变化特征,多年平均气温 8~11°C,多年平均降水量 300~600 mm,降水一般集中在 7—9 月,海拔 800~2 400 m,土壤类型以黄绵土为主。该区林草面积因退耕还林(草)工程实施而显著增加,草地覆盖率在 40%以上^[17]。本研究于黄土丘陵区选择 4 个典型退耕 20 年以上还林(草)区,分别为固原、定边、神木、安塞;其中:固原草地覆盖率为 45.6%,土壤以黄绵土、黑垆土、灰钙土为主;定边草地覆盖率为 40.3%,土壤以风沙土和黄绵土为主;神木草地覆盖率为 55.1%,土壤以风沙土和黄绵土为主;安塞草地覆盖率为 58.0%,土壤以黄绵土为主。各区域分布情况见图 1。

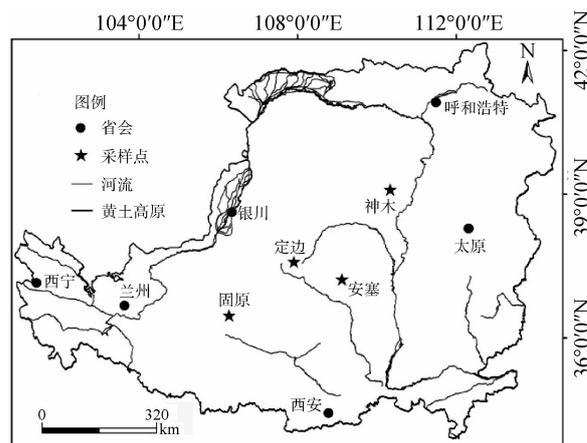


图 1 各研究区分布图

Fig.1 The distributions of study areas

1.2 样地选择

2020 年 6—9 月于 4 个研究区内分别选择具有代表性的退耕封禁草地和不同放牧强度退耕草地。采样前,通过走访当地牧民,结合地面可食植被的利用程度

以及践踏程度,同时考虑土壤质地、坡度、坡向、土地利用历史等自然因素,选取距离养殖户远近各异的退耕草地,在调查统计地表羊粪球密度^[18]的基础上,根据羊粪球密度选择不同强度放牧样地。分别如下:封禁地作为对照,放牧强度为 G0,羊粪球在 0~10 个·m⁻² 为

G1,10~20 个·m⁻² 为 G2,>20 个·m⁻² 为 G3。每个样地大小一般大于 100 m×100 m,各样地间距不小于 3km。根据以上原则和标准,不同区域的最终样地数分别为:固原 15 个、定边 15 个、神木 15 个、安塞 9 个,总共 54 个样地,样地信息见表 1。

表 1 样地基本信息

Table 1 Characteristics of studied sites

区域 Region	近 30 年平均降水量 Average precipitation in recent 30 years/mm	海拔 Altitude/ m	放牧强度 Grazing intensity	羊粪球密度 Density of dung balls/a·m ⁻²	样地数量 Number of samples	坡度 Slope/°	优势植被 Dominant plant species	植被盖度 Plant coverage/ %
固原	425	1 675~2 079	G0	0	3	6~11	披针苔草 <i>Carex dahurica</i> 、铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>	100
			G1	0~10	5	5~20	长芒草 <i>Stipa bungeana</i> 、小针茅 <i>S. capillata</i> 、芨芨草 <i>A. giraldii</i>	66.67
			G2	10~20	4	14~25	长芒草、地肤 <i>Kochia scoparia</i> 、匍匐委陵菜 <i>Potentilla reptans</i>	60.42
			G3	>20	3	9~15	长芒草、茵陈蒿 <i>A. capillaries</i> 、菊叶委陵菜 <i>P. tanacetifolia</i>	49.72
定边	317	1 526~1 721	G0	0	3	10	匍匐委陵菜、长芒草、小针茅	41.67
			G1	0~10	5	15~28	百里香 <i>Thymus mongolicus</i> 、长芒草、铁杆蒿	37.13
			G2	10~20	3	20~30	长芒草、铁杆蒿、茵陈蒿	22.46
			G3	>20	4	17~27	长芒草、茵陈蒿、百里香	25.78
神木	409	1 192~1 522	G0	0	3	<5	硬质早熟禾 <i>Poa sphondyliodes</i> 、无芒糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i> 、胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	42.67
			G1	0~10	3	17~20	长芒草、硬质早熟禾	46.81
			G2	10~20	5	10~20	长芒草、硬质早熟禾	36.38
			G3	>20	4	10	长芒草、草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i> 、茵陈蒿	11.92
安塞	505	1 193~1 208	G0	0	3	25	铁杆蒿	52.78
			G1	0~10	3	10~15	牡蒿 <i>A. japonica</i> 、白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> 、胡枝子	56.44
			G2	10~20	3	15~19	胡枝子、长芒草	37.22

1.3 样地调查与样品采集

在每个样地内用 25 样点法(25 cm×25 cm 样方)依样地形状按照梅花状或之字状布设 15 个样方,调查生物结皮种类及盖度,记录样方中藻、藓、地衣、裸土、小石砾、高等植物根基、枯落物的出现频次,以各类覆被物在调查总点数中的百分数计算其相应的覆盖度。同时记录采样区退耕年限、植被状况、海拔、坡度、坡向等立地条件。

在每个样地内样品采集采用 3 点混合采样,去除地表枯落物,采集生物结皮及下层土壤样品,具体采样层包括生物结皮层、0~2 cm 土层,采集后同层混合作为一个分析样,样品带回实验室,风干后过 18 目和 60 目筛,备用。

1.4 测定指标与方法

土壤有机碳采用重铬酸钾-外加加热法测定;全氮采用浓硫酸-混合催化剂消煮,凯氏定氮法测定;全磷采用高氯酸-硫酸消解,钼锑抗比色法测定^[19];土壤机械组成:马尔文 MS2000 激光粒度分析仪测定,采用国际制土壤质地分级标准,由于生物结皮有机质含量较高,为了充分分散土壤颗粒,对样品进行如

下前处理:先后采用 10% 和 30% 的过氧化氢(H₂O₂)浸泡,去除有机质,然后采用 0.2 mol·L⁻¹ 的 HCl 溶液浸泡以洗去土壤中的碳酸盐,再用 0.05 mol·L⁻¹ 的 HCl 浸泡土壤样品至无气泡;藓生物量:烘干法测定^[20],将风干遮光保存的藓结皮用水喷湿,使其脱离休眠状态,然后用打孔器取一定面积(0.95 cm²)的样品放入网筛中冲洗,收集网筛中藓植物放至称量瓶中,于 85℃ 杀青 30 min 后,65℃ 烘干至恒重后称重,计算出单位面积藓生物量(g·dm⁻²);藻生物量:乙醇萃取法测定^[21],在暗处用研钵研磨藻结皮,使藻体分散。取 3 g 样品装入具塞刻度试管中,向试管中加入 6 mL 乙醇,置于 65℃ 恒温水浴锅中水浴 5 min,取出冷却,震荡 20 min 后离心 10 min(全程在暗处进行),取上清液于波长 665 nm 处测吸光值,然后移取 100 μL,1 mol·L⁻¹ HCl 酸化,90 s 后于波长 665 nm 处测吸光值。藻类叶绿素 a 含量的计算公式为:

$$Chla = 29.6 \times \frac{(A_{665} - B_{665}) \times V}{M}$$

式中:Chla 为测定的叶绿素 a 含量(mg·g⁻¹);A₆₆₅ 和 B₆₆₅ 分别为萃取液酸化前和酸化后于波长

665 nm 处的吸光值; V 为萃取液体积 (mL); M 为土样质量 (g)

1.5 数据分析

数据统计处理采用 Excel2010, 运用 SPSS25.0 对各地区封禁与不同放牧强度下的退耕草地各土层土壤有机碳、全氮、全磷含量及 C : N、N : P、C : P 等进行方差分析 (Anova), 方差分析前对数据进行正态分布检验和同质性检验, 利用 Levene's test 检验方差齐性。方差齐性时使用 LSD 法进行多重比较 ($\alpha = 0.05$), 方差不齐时使用 Tamhane's T2 test 进行多重比较。对土壤 C : N、N : P、C : P 与放牧强度、土壤理化属性、地上生物量、枯落物生物量等指标进行 Pearson 双尾相关分析 ($\alpha = 0.05$), 利用

Origin2021 作图。

2 结果与分析

2.1 放牧强度对黄土丘陵区生物结皮盖度和生物量的影响

如图 2 所示, 不同放牧强度生物结皮盖度和生物量在各区域的变化特征各不相同。固原、定边、神木的藻、藓结皮盖度在各放牧强度间均无显著变化 (图 2A, B, C)。在安塞, 随放牧强度的增加, 藻结皮盖度无显著变化, 藓结皮盖度显著降低 ($P < 0.05$), 降幅为 71.4%~93.1% (图 2D)。各地区藻、藓结皮生物量随放牧强度增加均无显著变化 (图 2E, F, G, H)。

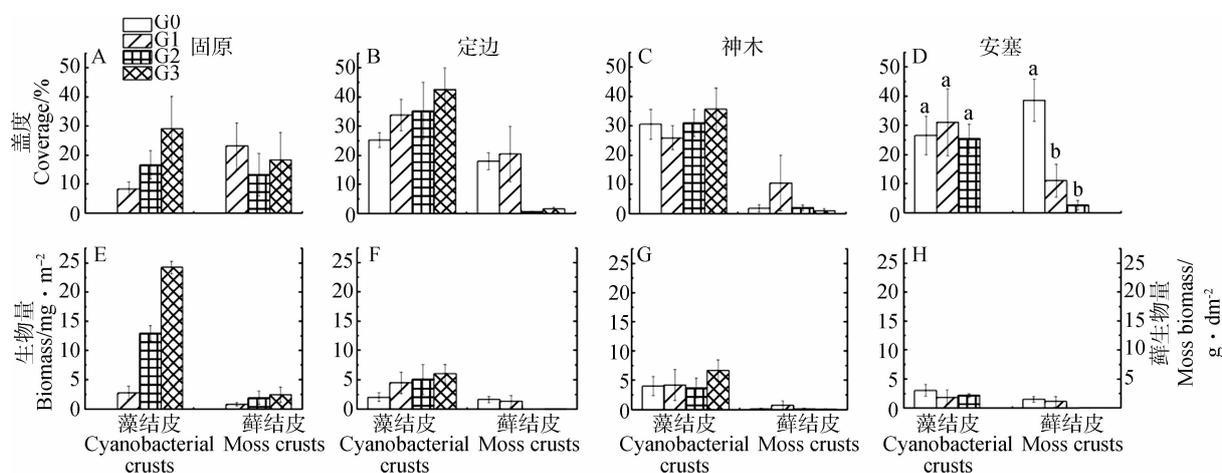


图 2 放牧强度对生物结皮盖度和生物量的影响

Fig.2 Effects of grazing intensity on the coverage and biomass of biological soil crusts

注: 不同小写字母表示同一类型结皮在不同放牧强度之间差异显著 ($P < 0.05$)。无字母标注, 表明同一类型结皮在不同放牧强度之间没有显著差异 ($P > 0.05$)

Note: Different small letters mean significant difference at 0.05 level among same type of crusts with the different grazing intensity. There is no significant difference at 0.05 level between them without letters labeled

2.2 放牧强度对黄土丘陵区退耕草地生物结皮土壤有机碳、全氮、全磷含量的影响

如图 3 所示, 与 G0 相比较, 黄土丘陵区退耕草地各放牧强度下的生物结皮层及 0~2 cm 土层 SOC、TN、TP 含量均无显著变化 (图 3A, B, C)。

2.3 放牧强度对生物结皮土壤有机碳、全氮、全磷含量影响的区域差异

如图 4 所示, 各区域不同放牧强度生物结皮层及 0~2 cm 土层 SOC、TN、TP 含量变化各有不同。在生物结皮层 (图 4A), 随放牧强度的增加, 固原、定边和安塞 SOC 含量均无显著变化, 神木在 G3 下的 SOC 含量较 G0 显著降低 ($P < 0.05$), 降幅约为

49.6%。在 0~2 cm 土层 (图 4B), 固原在各放牧强度下的 SOC 含量均较 G0 显著降低 ($P < 0.05$), 降幅为 50.8%~62.2%, 定边、神木和安塞在各放牧强度下的 SOC 含量较 G0 均无显著变化。

在生物结皮层 (图 4C), 随放牧强度的增加, 固原、定边和安塞的 TN 含量均无显著变化, 神木在 G3 较 G0 显著降低了 37.3% ($P < 0.05$)。在 0~2 cm 土层 (图 4D), 随放牧强度的增加, 固原的 TN 含量显著降低 ($P < 0.05$), 降幅为 44.9%~56.6%, 定边、神木和安塞的 TN 含量均无显著变化。

在生物结皮层, 随放牧强度的增加, TP 含量在各个地区均无显著变化 (图 4E)。在 0~2 cm 土层,

随放牧强度的增加,固原和定边的 TP 含量均无显著变化,神木在 G1 下较 G0 显著增加($P < 0.05$),增

幅约为 30.2%,安塞的 G2 强度较 G0 显著增加($P < 0.05$),增幅约为 6.9%(图 4F)。

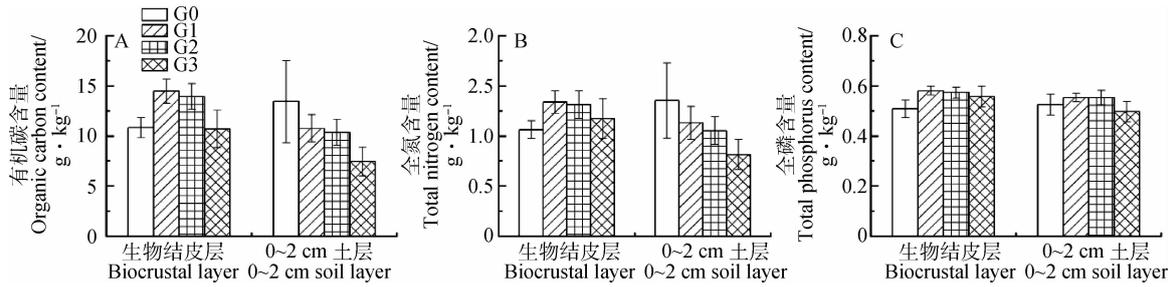


图 3 黄土丘陵区各放牧强度下生物结皮层及 0~2 cm 土层有机碳、全氮、全磷含量

Fig.3 Contents of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in the biocrustal layer and 0~2 cm soil layer under different grazing intensities in the hilly Loess Plateau region

注:同一土层不同放牧强度之间差异均不显著($P > 0.05$)

Note: There is no significant difference at 0.05 level among same soil layers with the different grazing intensity

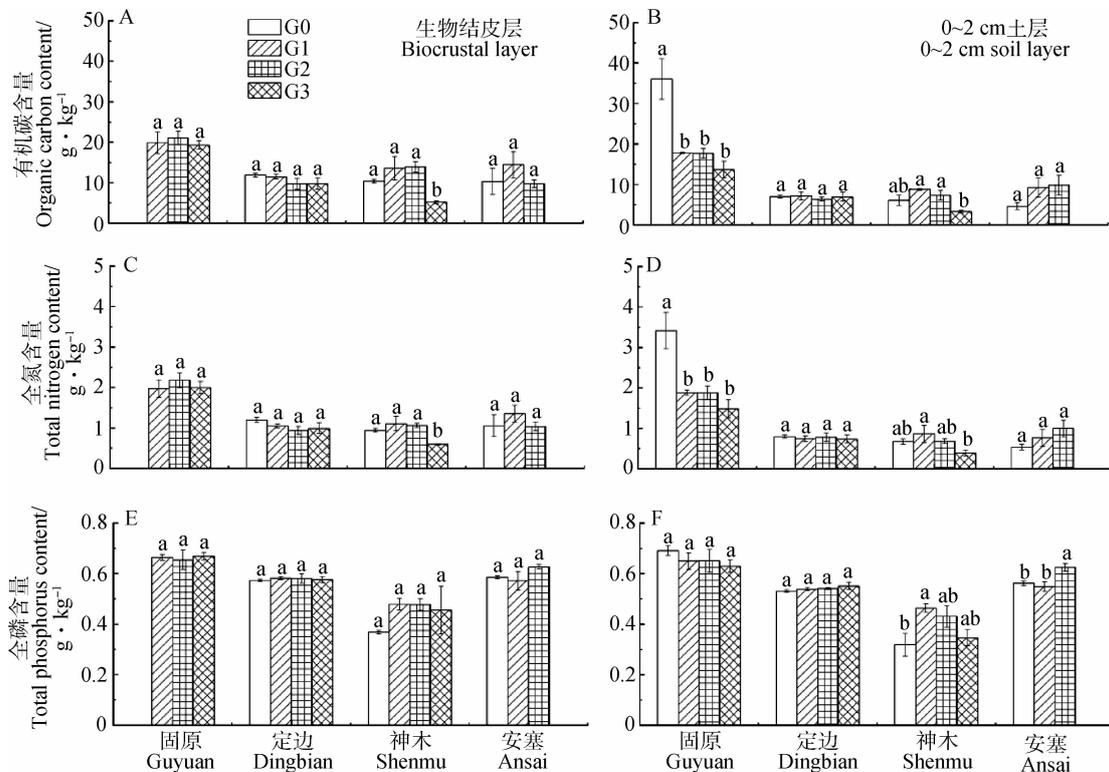


图 4 黄土丘陵区各区域不同放牧强度生物结皮层及 0~2 cm 土层有机碳、全氮、全磷含量

Fig.4 Contents of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in biocrustal layer and 0~2 cm soil layer with different grazing intensities in the hilly Loess Plateau region

注:不同小写字母表示同一地区不同放牧强度间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters mean significant difference at 0.05 level among different grazing intensities with the same area

2.4 放牧强度对黄土丘陵区退耕草地生物结皮土壤 C : N、N : P、C : P 的影响

如图 5 所示,不同放牧强度生物结皮层及 0~2 cm 土层 C : N、N : P、C : P 在黄土丘陵区退耕草地变化不同。各放牧强度下的生物结皮层和 0~2 cm 土层 C : N 较 G0 均无显著变化(图 5A)。随放牧强度的增加,生物结皮层 C : P 无显著变化;0~2

cm 土层呈降低趋势,其中 G3 较 G0 显著降低($P < 0.05$),降幅约为 40.2%(图 5B)。各放牧强度下的生物结皮层 N : P 较 G0 无显著变化;在 0~2 cm 土层,随放牧强度的增加,N : P 呈降低趋势,其中 G3 较 G0 显著降低($P < 0.05$),降幅约为 41.3%(图 5C)。综上所述,G3 会导致 0~2 cm 土层 N : P、C : P 降低。

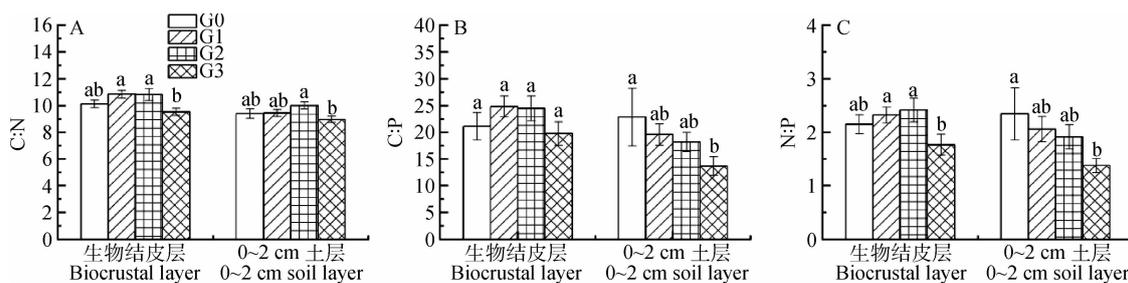


图 5 黄土丘陵区不同放牧强度下生物结皮层及 0~2 cm 土层 C : N、N : P、C : P

Fig.5 C : N, N : P, C : P in the biocrustal layer and 0~2 cm soil layer under different grazing intensities in the hilly Loess Plateau region

注:不同小写字母表示同一土层不同放牧强度间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters mean significant difference at 0.05 level among different grazing intensities with the same soil layer

2.5 放牧强度对生物结皮土壤生态化学计量学特征影响的区域差异

如图 6 所示,各区域不同放牧强度生物结皮层和 0~2 cm 土层 C : N、N : P、C : P 变化各有不同。在生物结皮层,固原、定边和安塞的 C : N 在各放牧强度间均表现为无显著变化,随放牧强度的增加,神木呈先增加后降低趋势,其中,G2 较 G0 显著增加($P < 0.05$),增幅为 18.4%(图 6A)。在 0~2 cm 土层,各放牧强度下,固原的 C : N 较 G0 显著降低($P < 0.05$),平均降幅为 11.1%,随放牧强度的增加,定边、神木和安塞的 C : N 均无显著变化(图 6B)。

在生物结皮层,固原、定边和安塞的 N : P 在各放牧强度间均无显著变化,随放牧强度的增加,神木的 N : P 呈降低趋势,其中,G3 较 G0 显著降低($P < 0.05$),降幅约为 49.6%(图 6C)。在 0~2 cm 土层,随放牧强度的增加,固原和神木的 N : P 较 G0 显著降低($P < 0.05$),平均降幅分别为 44.5%、43.9%,定边无显著变化,安塞呈先增加后降低趋势,其中 G1 较 G0 呈显著增加($P < 0.05$),增幅约为 114.0%,G2 较

G0 呈显著降低($P < 0.05$),降幅约为 41.0%(图 6D)。

在生物结皮层,固原、定边和安塞的 C : P 在各放牧强度间均无显著差异,随放牧强度的增加,神木 G3 较 G0 显著降低($P < 0.05$),降幅约为 55.7%(图 6E)。在 0~2 cm 土层,随放牧强度的增加,固原和神木的 C : P 均呈降低趋势,其中,固原在各放牧强度较 G0 显著降低 47.1%~58.6% ($P < 0.05$),神木在 G3 较 G0 显著降低 49.9% ($P < 0.05$),定边无显著变化,安塞呈先增加后降低趋势,其中 G1 较 G0 显著增加($P < 0.05$),增幅约为 160.9%(图 6F)。

2.6 环境因子对化学计量学特征的影响

由表 2 可知,C : N 与各环境因子无显著相关性;N : P 与粘粒、地上生物量、枯落物生物量呈极显著正相关($P < 0.01$),与藻结皮生物量、藓结皮生物量呈显著正相关($P < 0.05$),与藻结皮盖度呈极显著负相关($P < 0.01$);C : P 与地上生物量呈极显著正相关($P < 0.01$),与枯落物生物量、藻结皮生物量、藓结皮生物量呈显著正相关($P < 0.05$),与藻结皮盖度呈极显著负相关($P < 0.01$)。

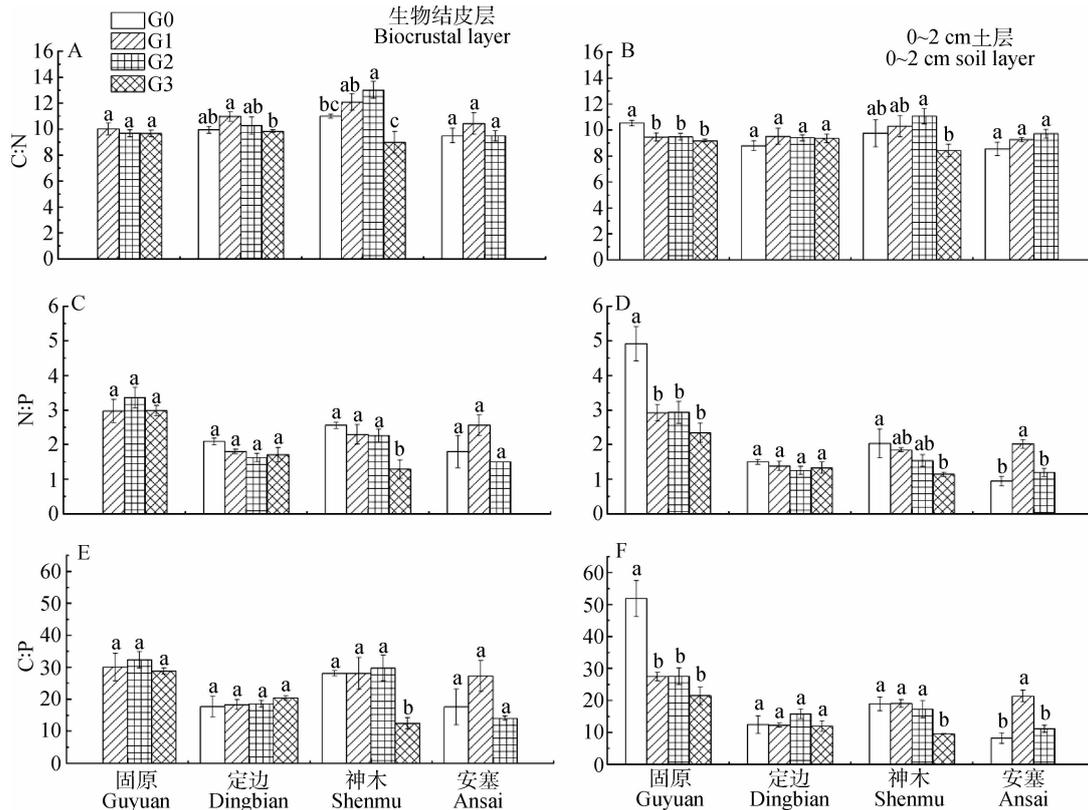


图 6 黄土丘陵区各区域不同放牧强度下生物结皮层及 0~2 cm 土层 C : N、C : P、N : P

Fig.6 C : N、C : P、N : P in biocrustal layer and 0~2 cm soil layer under different grazing intensities in the hilly Loess Plateau region
注:不同小写字母表示同一地区不同放牧强度间差异显著($P < 0.05$)

Note:Different small letters mean significant difference at 0.05 level among different grazing intensities with the same area

表 2 黄土丘陵区退耕地环境因子与化学计量学特征的相关关系

Table 2 Correlation between environmental factors and stoichiometry characteristics in the hilly Loess Plateau region

组分 Component	强度 Intensity	碳氮比 C : N	氮磷比 N : P	碳磷比 C : P	粘粒含量 Clay	枯落物生物量 LB	地上生物量 AB	藻盖度 Ccover	藓盖度 Mcover	藻生物量 Chla	藓生物量 MB
强度 Intensity	1.00	-0.17	-0.13	-0.07	0.22	-0.53**	-0.27	0.23	-0.40**	-0.13	-0.25
碳氮比 C : N		1.00	0.20	0.51**	-0.24	0.13	-0.19	-0.15	0.04	0.13	0.24
氮磷比 N : P			1.00	0.88**	0.44**	0.44**	0.67**	-0.45**	0.19	0.32*	0.32*
碳磷比 C : P				1.00	0.23	0.35*	0.44**	-0.39**	0.14	0.35*	0.35*
粘粒 Clay					1.00	0.17	0.55**	-0.22	0.16	-0.01	0.04
枯落物生物量 LB						1.00	0.66**	-0.39**	0.42**	0.29*	0.23
地上生物量 AB							1.00	-0.50**	0.47**	0.35*	2.00
藻盖度 Ccover								1.00	-0.49**	-0.30*	-0.39**
藓盖度 Mcover									1.00	0.52**	0.44**
藻生物量 Chla										1.00	0.45**
藓生物量 MB											1.00

注: **表示极显著相关($P < 0.01$), *表示显著相关($P < 0.05$)

Note: ** is significant correlation at the 0.01 level, and * is significant correlation at the 0.05 level

LB: 枯落物生物量 Litter biomass; AB: 地上生物量 Aboveground biomass; Ccover: 藻结皮盖度 Cyanobacterial cover; Mcover: 藓结皮盖度 Moss cover; Chla: 藻结皮生物量 Cyanobacterial biomass; MB: 藓结皮生物量 Moss biomass

3 讨论

3.1 放牧强度对生物结皮土壤的有机碳、全氮、全磷含量的影响

土壤 SOC、TN、TP 含量与其肥力状况密切相关,放牧可通过动物觅食、踩踏、排泄等方式影响土壤养分状况^[16]。在固原,由于封禁草地退耕年限在 35 年以上,草地植被发育良好,已无生物结皮覆盖,不考虑 G0 时,不同放牧强度间的生物结皮层 SOC、TN 含量无显著差异;各放牧强度下的 0~2 cm 土层 SOC、TN 均较 G0 显著降低,这与丁小慧等^[22]研究结果一致。在神木,G3 下的结皮层和 0~2 cm 土层 SOC、TN 含量较 G0 降低,裴雯等^[23]在内蒙古草原也有相似发现,其原因可能是由于 G3 样地的羊粪球密度高于 40 个·m⁻²,属于超强度放牧,放牧达到一定强度会引起植被盖度降低,水土流失风险加剧^[4],并导致 SOC 和 TN 的降低。对于定边和安塞地区,各放牧强度下的生物结皮层和 0~2 cm 土层土壤 SOC、TN 含量均较封禁无显著变化。而韩炳宏^[24]认为,较封禁样地,放牧样地生物结皮层和 0~2 cm 土层土壤 SOC、TN 含量显著降低。本研究发现,放牧均不会降低四个地区的生物结皮层及 0~2 cm 土层土壤 TP 含量。其中,在神木和安塞,一定程度的放牧可增加 0~2 cm 土层土壤 TP 含量,其原因可能是因为动物排泄物增加了土壤磷的含量^[25];在 G3 强度下无显著变化,可能是因为该强度导致土壤压实^[3]。侯扶江等^[26]研究发现,放牧能促进土壤 TP 素累积,另有相关研究^[27]发现,随放牧强度的增加,植被及地上枯落物归还量减少,土壤 TP 含量降低,而宋洁等^[28]认为,放牧并不能导致土壤 TP 发生改变。可见,放牧对土壤性质的影响可能因各地区环境因素而异^[7]。

总体来看,各放牧强度对黄土丘陵区退耕草地 SOC、TN、TP 均较封禁无显著影响。但由于本研究中所选取的四个研究区空间跨度较大,各自 SOC、TN、TP 变化趋势不同,这与 Milchunas 和 Lauenroth^[7]对全球 236 处研究区的分析结论一致,各研究区结果差异可能与地理位置、气候、成土因素和土壤质地等有关^[29]。另外,黄土丘陵区不同放牧强度下退耕草地生物结皮层 SOC、TN、TP 含量变化范围分别为 10.71~14.48,1.06~1.34 和 0.51~0.58 g·kg⁻¹;0~2 cm 土层 SOC、TN、TP 含量变化范围分别为 7.44~13.43,0.81~1.35,0.50~0.55 g·kg⁻¹,与全国土壤 SOC、TN、TP 平均水平(依次为 11.12,1.06,0.65 g·kg⁻¹)基本一致^[15]。综上,

适当的放牧不会对黄土丘陵区退耕草地土壤养分产生负效应。

3.2 放牧强度对生物结皮土壤 C:N、C:P、N:P 的影响

生态化学计量学理论认为有机体存在一个相对稳定的 C:N:P 比值,因此,通过该理论可判断有机体生长、发育和繁殖的限制性元素^[14]。土壤 C:N 被认为是影响土壤质量的敏感指标,并且会影响 SOC 和 TN 的循环^[14]。由于地域性差异,各地区 C:N 变化趋势不同。在内蒙古克氏针茅草原的研究表明,随放牧强度的增加,土壤 C:N 先降低后增加^[30],与之不同,本研究中,在固原,放牧使 0~2 cm 土层 C:N 降低,这与封禁样地有机碳含量显著高于放牧样地有关;在定边、神木和安塞,各放牧强度下的生物结皮层及 0~2 cm 土层 C:N 较 G0 无显著变化。土壤 C:P 的高低是土壤 P 素有效性的一个判断指标^[14]。在固原,与 C:N 相似,放牧样地的 0~2 cm 土层 C:P 较 G0 降低;在定边和安塞,各放牧强度下的生物结皮层和 0~2 cm 土层 C:P 在均无降低现象;在神木,G3 降低了生物结皮层和 0~2 cm 土层 C:P,这与 G3 强度下的 SOC 含量降低有关。土壤 N:P 通常被认为是衡量生态系统 N 和 P 养分限制的一个指标^[14],由于 SOC 和 TN 相关性强,因此各区域生物结皮层及 0~2 cm 土层 N:P 与 C:P 变化趋势一致。

总体来看,相较于 G0,G1 和 G2 放牧强度对黄土丘陵区退耕草地生物结皮层及 0~2 cm 土层 C:N、N:P、C:P 无显著影响,而 G3 放牧强度使生物结皮层及 0~2 cm 土层 N:P、C:P 降低。与本研究不同,Yang 等^[31]研究表明,放牧强度增加会使土壤 C:N 降低、土壤 C:P 和 N:P 增加;这可能与本研究中的放牧强度不同有关。另外,本研究结果显示,黄土丘陵区不同放牧强度下退耕草地生物结皮层 C:N、N:P、C:P 变化范围分别为 9.52~10.85,1.77~2.41,19.81~24.82;0~2 cm 土层 C:N、N:P、C:P 变化范围分别为 8.97~9.45,1.37~2.35,13.69~22.88,这与杨巧云等^[13]在黄土丘陵区的研究结果相似。C:N 与全国土壤平均水平 11.90^[13]接近,但是 N:P、C:P 较全国土壤平均水平 5.20,61.00 偏低,这与黄土丘陵区退耕草地土壤 TN 和 TP 偏低有关。综上,从生态化学计量学的角度来说,适当的放牧对黄土丘陵区退耕草地生物结皮土壤化学计量学特征无显著影响,当放牧超过一定强度后,生态化学计量比降低,同时,会减弱土壤 TP 的限制作用。

4 结论

放牧显著降低了安塞藓结皮盖度,降幅为 71.4%~93.1%,而对其他地区藓结皮盖度无显著影响,且对各个地区的藻结皮盖度和生物量均无显著影响;放牧强度小于 G3(羊粪球密度为 0~20 个·m⁻²)时,对黄土丘陵区退耕草地的生物结皮层及 0~2 cm 土层土壤养分含量及化学计量学特征未造成显著降低现象;生物结皮土壤化学计量学特征除与放牧强度有关以外,还与粘粒、枯落物生物量、地上生物量、藻生物量、藓生物量、藻盖度等有关。

参考文献

- [1] 侯扶江,杨中艺.放牧对草地的作用[J].生态学报,2006(1):244-264
- [2] 刘国彬,王国梁,上官周平,等.黄土高原地区水土保持科学研究的重点领域[J].中国水土保持,2008(12):37-39,72
- [3] 王明君,赵萌莉,崔国文,等.放牧对草甸草原植被和土壤的影响[J].草地学报,2010,18(6):758-762
- [4] 王玉辉,何兴元,周广胜.放牧强度对羊草草原的影响[J].草地学报,2002(1):45-49
- [5] REEDER J D, SCHUMAN G E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 457-463.
- [6] 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
- [7] MILCHUNAS D G, LAUENROTH W K. Quantitative Effects of Grazing on Vegetation and Soils Over a Global Range of Environments[J]. Ecological Monographs, 1993, 63(4): 327-366
- [8] BELNAP J. Biological soil crusts in deserts; a short review of their role in soil fertility, stabilization, and water relations[J]. Aridological Studies, 2003, 109 (109): 113-126
- [9] 赵允格,许明祥,王全九,等.黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J].自然资源学报,2006,21(3):441-448
- [10] 杨凯,赵允格,马昕昕.黄土丘陵区生物结皮层水稳性[J].应用生态学报,2012,23(1):173-177
- [11] 冉茂勇,赵允格,刘玉兰.黄土丘陵区不同盖度生物结皮土壤抗冲性研究[J].中国水土保持,2011(12):43-45
- [12] 张侃侃,卜崇峰,高国雄.黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J].干旱区研究,2011,28(5):808-812
- [13] 杨巧云.黄土丘陵区生物结皮土壤生态化学计量学特征及其对干扰的响应[D].杨凌:西北农林科技大学,2019:50-51
- [14] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHNOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550
- [15] TIAN H, CHEN G, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils; a synthesis of observational

- data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1-3): 139-151
- [16] BAI Y F, WU J G, CLARK C M, et al. Grazing alters ecosystem functioning and C : N : P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient[J]. Journal of Applied Ecology, 2012, 49(6): 1204-1215
- [17] GANG C C, ZHAO W, ZHAO T, et al. The impacts of land conversion and management measures on the grassland net primary productivity over the Loess Plateau, Northern China
- [18] OÑATIBIA G R, BOYEROL, AGUIAR M R. Regional productivity mediates the effects of grazing disturbance on plant cover and patch-size distribution in arid and semi-arid communities[J]. Oikos, 2018, 127(8): 1205-1215
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:30-74
- [20] 高丽倩,赵允格,许明祥,等.生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量学特征的影响[J].生态学报,2018,38(2):678-688
- [21] CASTLE S C, MORRISON C D, BARGER N N. Extraction of chlorophyll a from biological soil crusts; A comparison of solvents for spectrophotometric determination[J]. Soil biology and Biochemistry, 2011, 43(4): 853-856
- [22] 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):4722-4730
- [23] 裴雯,陈清,张洛梓,等.放牧、水分和氮素对内蒙古草原土壤团聚体的影响[J].草地学报,2021,29(7):1499-1506
- [24] 韩炳宏,牛得草,袁晓波,等.围封与放牧措施下生物土壤结皮发育及其微生境土壤养分特征[J].草地学报,2016,24(6):1218-1225
- [25] 杜子银,蔡延江,王小丹,等.放牧牲畜粪便降解及其对草地土壤养分动态的影响研究进展[J].生态学报,2019,39(13):4627-4637
- [26] 侯扶江,任继周.甘肃马鹿冬季放牧踏作用及其对土壤理化性质影响的评价[J].生态学报,2003,23(3):486-495
- [27] HAN W, LUO Y, DU G. Effects of clipping on diversity and above-ground biomass associated with soil fertility on an alpine meadow in the eastern region of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2007, 50 (3): 361-368
- [28] 宋洁,王凤歌,温璐,等.放牧对温带典型草原植物物种多样性及土壤养分的影响[J].草地学报,2019,27(6):1694-1701
- [29] MCNAUGHTON S J, BANYIKWA F F, MCNAUGHTON M M. Promotion of the cycling of diet-enhancing nutrients by African grazers[J]. Science, 1997, 278(5344): 1798-1800
- [30] 张旭冉,张卫青,王海茹,等.克氏针茅草原土壤生态化学计量特征对放牧强度的响应[J].生态学报,2021,41(13):1-8
- [31] YANG Z N, ZHU Q A, HAN W, et al. The linkage between vegetation and soil nutrients and their variation under different grazing intensities in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Ecological Engineering, 2018(110): 128-136

(责任编辑 彭露茜)