



围封对藏北高寒草原土壤矿质元素和群落特征的影响

郭晨睿 杨敬坡 李少伟 牛 马娇林 武建双

Effects of grazing exclusion by fencing on soil mineral elements and plant community in alpine steppes of the northern Tibetan Plateau

GUO Chenrui, YANG Jingpo, LI Shaowei, NIU Ben, MA Jiaolin, WU Jianshuang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0669>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

围栏封育高寒草地植物地上生物量和物种多样性对关键调控因子的响应

Responses of aboveground biomass and species richness to environmental factors in a fenced alpine grassland

草业科学. 2019, 36(4): 1000 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0032>

围封年限对西藏高寒草甸植被特征与土壤养分的影响

Effect of livestock exclusion duration years on plant and soil properties in a Tibetan alpine meadow

草业科学. 2018, 12(1): 10 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0366>

围栏封育对高寒草原植被土壤养分含量的影响

Effects of enclosure on plant and soil nutrients in an alpine grassland

草业科学. 2021, 38(3): 399 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0368>

休牧对西藏高寒草原和高寒草甸植被与土壤特征的影响

Effects of rest grazing on vegetation and soil characteristics of alpine steppe and alpine meadow in Tibet

草业科学. 2020, 37(3): 486 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0423>

2010-2017年藏北高寒退化草地禁牧恢复效果评价

Effectiveness of grazing exclusion on the restoration of degraded alpine grasslands on the Northern Tibetan Plateau from 2010 to 2017

草业科学. 2019, 36(4): 1148 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0016>

水氮耦合对荒漠草原植物物种多样性及生物量的影响

Effect of water and nitrogen interaction on plant species diversity and biomass in a desert grassland

草业科学. 2018, 12(1): 36 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0167>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0669

郭晨睿, 杨敬坡, 李少伟, 牛犇, 马娇林, 武建双. 围封对藏北高寒草原土壤矿质元素和群落特征的影响. 草业科学, 2022, 39(4): 645-659.

GUO C R, YANG J P, LI S W, NIU B, MA J L, WU J S. Effects of grazing exclusion by fencing on soil mineral elements and plant community in alpine steppes of the northern Tibetan Plateau. Pratacultural Science, 2022, 39(4): 645-659.

围封对藏北高寒草原土壤矿质元素和群落特征的影响

郭晨睿^{1,2}, 杨敬坡¹, 李少伟³, 牛犇³, 马娇林⁴, 武建双²

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北 石家庄 050018; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 西藏自治区畜牧总站, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 围封封育是退化草地生态恢复的常见措施之一。土壤矿质元素含量影响植物个体生长发育和群落结构功能演替。为评价围封封育对高寒草原土壤矿质元素和植物群落特征的影响, 本研究于 2010–2013 年夏季对班戈县北拉镇和普保镇 2 块样地 (围封内外) 进行植物和土壤采样, 测定群落水平植物物种多样性、地上生物量以及表层土壤 Ca、Cu、Fe、Mg、Mn 和 Zn 含量。结果显示: 1) 5~8 年围封封育只显著降低了北拉镇样地土壤 Ca、Mg 和 Cu 含量 ($P < 0.05$), 显著提高了普保镇样地土壤 Cu 含量 ($P < 0.05$), 对 Fe、Mn 和 Zn 含量无显著影响 ($P > 0.05$)。2) 围封封育只显著提高了普保镇样地地上生物量 ($P < 0.05$), 对植物物种多样性无显著影响 ($P > 0.05$)。3) 方差分析结果显示, 仅土壤 Mg 含量与地上生物量显著相关 ($P < 0.05$), 各土壤矿质元素含量对植物物种多样性均无显著影响 ($P > 0.05$)。综上所述, 短期围封封育对高寒草原土壤矿质元素和植物群落的恢复的影响有限。

关键词: 地上生物量; 高寒草原; 围封; 禁牧; 微量养分; 矿质元素

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)04-0645-15

Effects of grazing exclusion by fencing on soil mineral elements and plant community in alpine steppes of the northern Tibetan Plateau

GUO Chenrui^{1,2}, YANG Jingpo¹, LI Shaowei³, NIU Ben³, MA Jiaolin⁴, WU Jianshuang²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Tibet Animal Husbandry Service Center, Lhasa 850000, Tibet, China)

Abstract: Grazing exclusion by fencing is one of the common measures to recover degraded grasslands. The content of mineral elements in soils can affect individual plant growth and community succession. To evaluate the effect of grazing exclusion by fencing on soil mineral element content and plant community characteristics in alpine steppes, two sampling plots in Beila and Pubao of Bange County were selected. Plants and topsoil samples were collected from inside and outside the fences in summer from 2010 to 2013. Species diversity, aboveground biomass, and contents of soil Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, and Zn were analyzed. The results showed that 1) Ca, Mg, and Cu contents in the soil in Beila Town decreased by 57.1%,

收稿日期: 2021-11-06 接受日期: 2021-12-27

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究任务十专题二《农牧耦合绿色发展的资源基础考察研究》(2019QZKK1002)

第一作者: 郭晨睿 (1998-), 女, 河北石家庄人, 在读硕士生, 主要从事草地土壤生态学研究。E-mail: guo.chenrui@outlook.com

通信作者: 武建双 (1983-), 男, 河北宁晋人, 研究员, 博导, 博士, 主要从事青藏高原气候变化和草地资源可持续性管理研究。

E-mail: wujianshuang@caas.cn

24.1%, and 37.4%, respectively, while the content of soil Cu in the Pubao Town significantly increased relative to open grazed plots, i.e., and increase of 25.2% due to the short-term (5~8 years) grazing exclusion ($P < 0.05$); however, no significant differences in soil Fe, Mn, and Zn were found between fenced and grazed sites ($P > 0.05$). 2) Aboveground biomass in Pubao Town increased significantly ($P < 0.05$) due to grazing exclusion, but no significant difference in species diversity was observed between fenced and grazed sites ($P > 0.05$). 3) Results of ANCOVA showed that only soil Mg content was significantly correlated with aboveground biomass ($P < 0.05$), while the content of all soil mineral elements had no significant effect on plant species diversity ($P > 0.05$). Our findings indicated that the effects of short-term grazing exclusion by fencing on soil mineral element content and plant community in alpine steppes may be limited.

Keywords: aboveground biomass; alpine steppe; fencing; grazing exclusion; micronutrient; mineral elements

Corresponding author: WU Jianshuang E-mail: wujianshuang@caas.cn

草地是青藏高原面积最大的生态系统。受气候变化和过度放牧双重影响,近年来青藏高原高寒草地严重退化^[1]。2003年我国启动了“退牧还草”工程^[2],广泛建设网围栏来排除放牧干扰、促进退化草地自我恢复^[3-5]。关于围封年限对植物群落结构和功能的影响存在很大争议。有研究认为,短期禁牧封育可以改善草地群落组成,提高植被覆盖度和地上生物量^[6-7],改善土壤理化性质以及土壤微生物群落^[8-10]。例如,毛绍娟等^[11]发现围栏封育可以提高藏北高寒草原禾草、莎草等可食牧草生物量,降低杂类草优势度。也有研究认为,尽管长期封育可提高植物物种多样性^[12],但不利于群落生产力的持续改善^[13-14]。当前研究对围栏封育是否显著影响土壤养分含量也存有一定争议。有研究表明,短期围栏封育(2年)能显著提高青藏高原高寒草甸表层土壤磷含量,但对全碳含量无影响^[15]。>10年长期围栏封育可显著改善青藏高原高寒草甸土壤碳氮含量^[16-17]。但尹亚丽等^[18]在三江源高寒草甸发现,即使10年围栏封育也不能明显改变土壤有机碳、全氮、全磷含量。在藏北高原仅有少量研究,Lu等^[19]发现短期围栏封育对藏西北高寒草地0-30 cm土壤有机碳、速效氮和速效磷含量无显著影响,但可能降低土壤表层(0-15 cm)总氮和总磷含量。因此,探讨围栏封育对藏北草地土壤的恢复效果需要进行更全面、更深入地研究。

矿质元素是土壤养分重要组成部分,对维持植物正常的生理功能具有重要作用。例如,镁和锌是叶绿素的组成成分;铁、铜、锰等也会影响叶绿素的合成^[20]。另外,作为酶的组成成分,某些矿质元素会影响植物体内氧化还原反应及大分子的合成。例

如,铜、锰和锌在植物氧化还原反应中起催化作用;镁和锌元素可以影响蛋白质合成^[21-22]。此外,矿质元素对于增强植物抗逆性有积极作用。适宜浓度的外源钙和外源锌能够提高植物抗氧化酶活性进而提高植物的抗寒性^[23-24]。但对围栏封育是否影响和如何影响草原土壤矿质元素含量的研究较少。张建鹏等^[25]发现围封13年会显著增加沙化草地0-20 cm土层铜、锰和锌的含量,降低10-20 cm土层铁的含量。Radujkovic等^[26]对全球草地生物量和土壤养分进行了分析,发现矿质微量元素对草原生产力存在潜在重要影响。因此,针对藏西北干旱气候区围栏封育管理下土壤矿质元素动态进行研究有利于更全面地了解围封对草地生态功能的恢复机制。

截至2014年,西藏自治区共有2.96亿亩(约 $1.97 \times 10^7 \text{ hm}^2$)草原发生不同程度的退化,其中68%集中分布在藏北羌塘那曲市和阿里地区^[27]。2003-2012年期间,西藏共建设围栏8641万亩(约 $5.76 \times 10^6 \text{ hm}^2$)^[28],其中藏北地区共有围栏4981万亩(约 $3.32 \times 10^6 \text{ hm}^2$),主要集中在紫花针茅(*Stipa purpurea*)草原区。高寒草原是藏北地区主要草地类型,约占该地区总面积45%^[29]。因此,本研究以围栏封育和自由放牧样地为研究对象,通过连续4年野外实地采样与分析,探究围栏封育对高寒草原土壤矿质元素含量是否有显著影响;围栏封育对高寒草原地上生物量及物种多样性是否有显著影响;土壤矿质元素与地上生物量和物种多样性是否存在显著关系。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

样地位于西藏那曲市班戈县(88°56'~91°18'E,

29°55′ ~ 32°15′ N) 北拉镇和普保镇。班戈县共有草原 3 630.93 万亩 (约 $2.42 \times 10^6 \text{ hm}^2$), 其中紫花针茅类草原 846.55 万亩 (约 $5.64 \times 10^5 \text{ hm}^2$), 平均海拔为 4 750 m, 地势西高南低。气候属高原亚寒带半干旱季风气候, 年平均气温 0 ℃ 左右, 年平均降水量介于 300~450 mm, 主要集中在 6 月 - 9 月。土壤类型为高山草原土, 植被群落优势物种为紫花针茅, 伴生伊凡苔草 (*Carex ivanovae*)、羊茅 (*Festuca ovina*)、早熟禾 (*Poa annua*) 等^[30]。样地气温与降水数据源于国家气象科学数据中心 (表 1)。

表 1 研究区域概况
Table 1 Information of study area

样地 Plot	处理 Treatment	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude/ m	年均气温 Annual mean temperature/ ℃	年均降水 Annual mean Precipitation/ mm	生长季气温 Growing season temperature/ ℃	生长季降水量 Growing season precipitation/ mm
北拉镇 Beila Town	围封 Fenced	90°48′5.81″	31°24′41.37″	4 603	0.166	461.0	7.544	403.4
	放牧 Grazed	90°48′8.18″	31°24′41.07″	4 608				
普保镇 Pubao Town	围封 Fenced	90°18′43.46″	31°23′39.58″	4 590	0.196	423.6	7.723	382.5
	放牧 Grazed	90°18′41.96″	31°23′39.00″	4 596				

1.2 试验设计与样品采集

所选样地围栏在 2006 年建成。2010–2013 年 7 月下旬或 8 月上旬, 在无雨无雪的天气条件下对样地围栏内外进行取样。在围栏内外随机抛出 30 次 0.1 m² 样圈, 记录植物物种名称和出现次数, 用以计算各物种相对频度。在北拉镇和普保镇各选择一对围栏封育和自由放牧样地, 在围栏内外分别随机设置 5 个间隔不小于 20 m 的 0.5 m × 0.5 m 样方, 共计 5 个重复。分种记录样方内各植物名称、盖度、高度。分物种齐地面剪取植物地上部分, 装入信封保存并带回。放牧引起的土壤理化性质变化主要发生在土壤表层^[31], 这一层次是高寒草原植物根系主要分布区^[32], 因此本研究土壤取样深度定为 0–10 cm。在每个样方的东、南、西、北以及中心点用直径 3 cm 的土钻采集土壤样品, 并进行充分混合, 去除肉眼可见的碎石、根系和凋落物等杂质, 装入土布袋并带回实验室风干后进行元素分析。

1.3 指标测定

地上生物量样品在 65 ℃ 烘干至恒重并称重, 精确至 0.001 g, 分物种记录干重, 各样方地上生物量为各物种干重之和, 5 个样方地上生物量平均值为样地地上生物量。本研究通过样方内各物种相对盖度 (relative coverage, C_r)、相对高度 (relative height, H_r) 和相对频度 (relative frequency, F_r) 计算 Shannon-

Wiener 指数。公式如下:

$$IV = (C_r + H_r + F_r)/3; \tag{1}$$
$$P_i = IV_i / \sum IV_i; \tag{2}$$
$$\text{Shannon-Wiener} = - \sum P_i \ln P_i. \tag{3}$$

式中: *IV* 为物种重要值, *P_i* 为第 *i* 个物种的相对重要值。土壤风干样品过 2 mm 筛去除杂质后, 使用研磨仪 (MM400-德国 RETSCH) 将样品粉碎研磨。矿质常量元素 (Ca 和 Mg) 的测定使用醋酸铵溶液作为提取液, 矿质微量元素 (Cu、Mn、Fe 和 Zn) 使用二乙烯三胺五乙酸 (DTPA) 萃取, 采用微波密闭消解电感耦合等离子发射光谱法 (ICP-AES) 对矿质微量和常量元素的含量进行测定^[33]。

1.4 数据分析

采用双因素方差 (Two-way ANOVA) 分析检验各矿质元素含量、地上生物量及 Shannon-Wiener 指数在不同年份间及围栏内外的差异。采用单因素方差分析比较同一样地围栏内外土壤矿质元素含量的差异。在方差分析前, 对所有数据进行正态性检验 (Shapiro-Wilk 检验) 和方差齐性检验 (Bartlett 检验), 对不满足正态性检验的数据取对数或平方根进行转换。采用一般线性混合模型, 将草地利用方式 (围封或放牧)、样地位置、采样年份作为影响因子, 通过方差分析量化三者主效应及交互作用对各矿

质元素含量、植物物种多样性和群落地上生物量的相对影响。采用 Spearman 相关系数法探究气候因子、群落特征和土壤各矿质元素间的相关性。利用双变量回归分析探究围栏内外地上生物量和物种多样性随气候因子和土壤矿质元素含量的变化规律。最后,采用协方差分析 (ANCOVA) 检验围封措施和土壤矿质元素对地上生物量和物种多样性的影响,固定因素为围封 (放牧) 处理,协变量为土壤矿质元素。所有数值均采用平均值 $\pm$ 标准误差来表示。数据分析和图表制作均采用 R 4.0.3^[34]。

2 结果

2.1 围栏内外土壤矿质元素含量的年际变化

在矿质常量元素中,仅普保镇围栏内外土壤 Ca 含量在各采样年份间变化规律一致 (图 1); 北拉镇样地围栏内外土壤 Ca 含量的差异逐年减小。北

拉镇样地 2010 年和 2011 年围栏外土壤 Ca 和 Mg 含量显著高于围栏内。在矿质微量元素中,围栏内外北拉镇的 Zn 含量和普保镇的 Mn 含量随年份增减规律完全一致 (图 2)。北拉镇围栏内外 Cu 含量在前 3 年保持稳定,但在第 4 年变化趋势完全相反且差异显著 ($P < 0.05$),其他样地围栏内外微量元素含量大致呈先减小后增加的趋势。同一元素围栏内外含量差异的年际变化在样地间不一致。

与放牧地相比,围栏封育对土壤 Ca、Cu 和 Mg 含量的影响显著 ($P < 0.05$) (表 2),其中围栏封育在北拉镇对 Ca、Mg 和 Cu 的含量有显著或极显著的影响 (分别降低了 57.1%、24.1% 和 37.4%),围栏封育对普保镇 Cu 含量有显著影响 (增加了 23.5%) (图 3)。围栏 $\times$ 样地及围栏 $\times$ 年份对土壤 Ca、Cu 和 Mg 含量有显著的影响 ($P < 0.05$) (表 2),围栏、样地和年份三者的交互作用对土壤 Ca、Cu、Fe 和 Mn 含量的影响

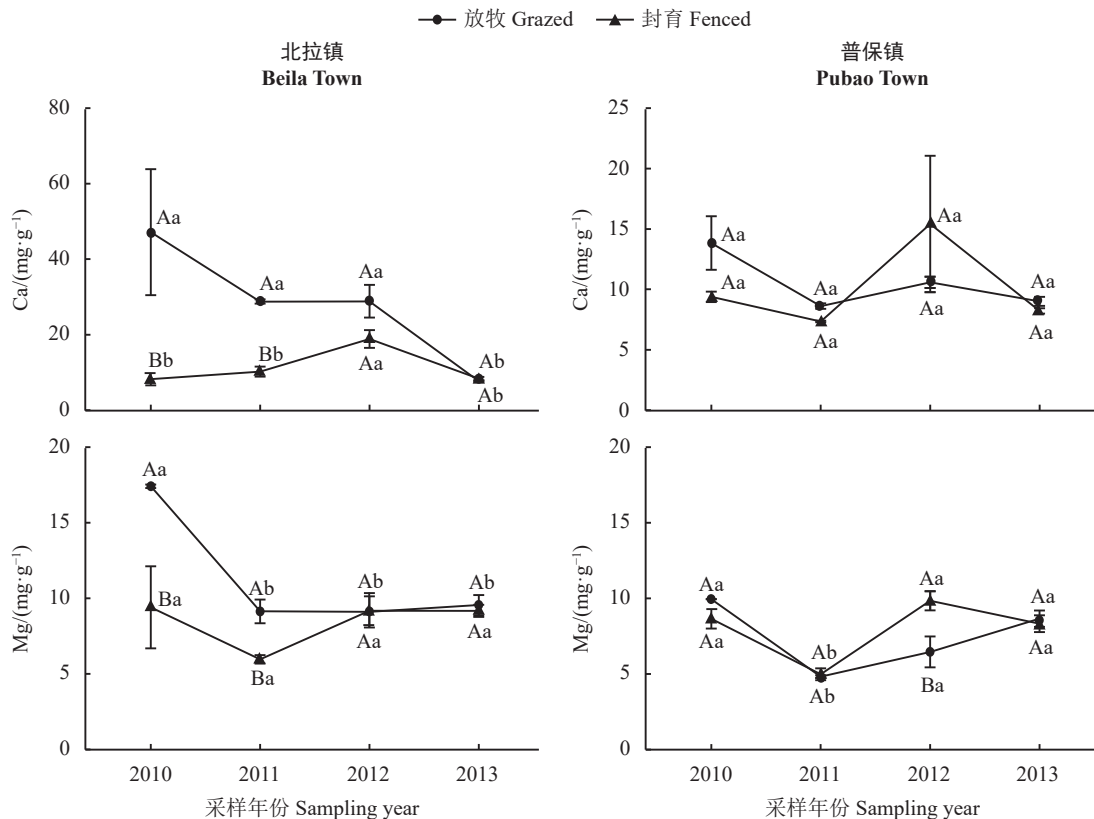


图 1 各采样年份矿质常量元素含量

Figure 1 Mineral macronutrient contents in each sampling year

不同大写字母表示围栏内外差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同年份间差异显著 ($P < 0.05$); 图 2、图 4 同。

Different capital letters indicate significant differences between within and outside fences for the same sampling year at the 0.05 level; and different lowercase letters indicate significant differences between different sampling years within or outside fences at the 0.05 level; this is applicable for Figure 2 and Figure 4 as well.

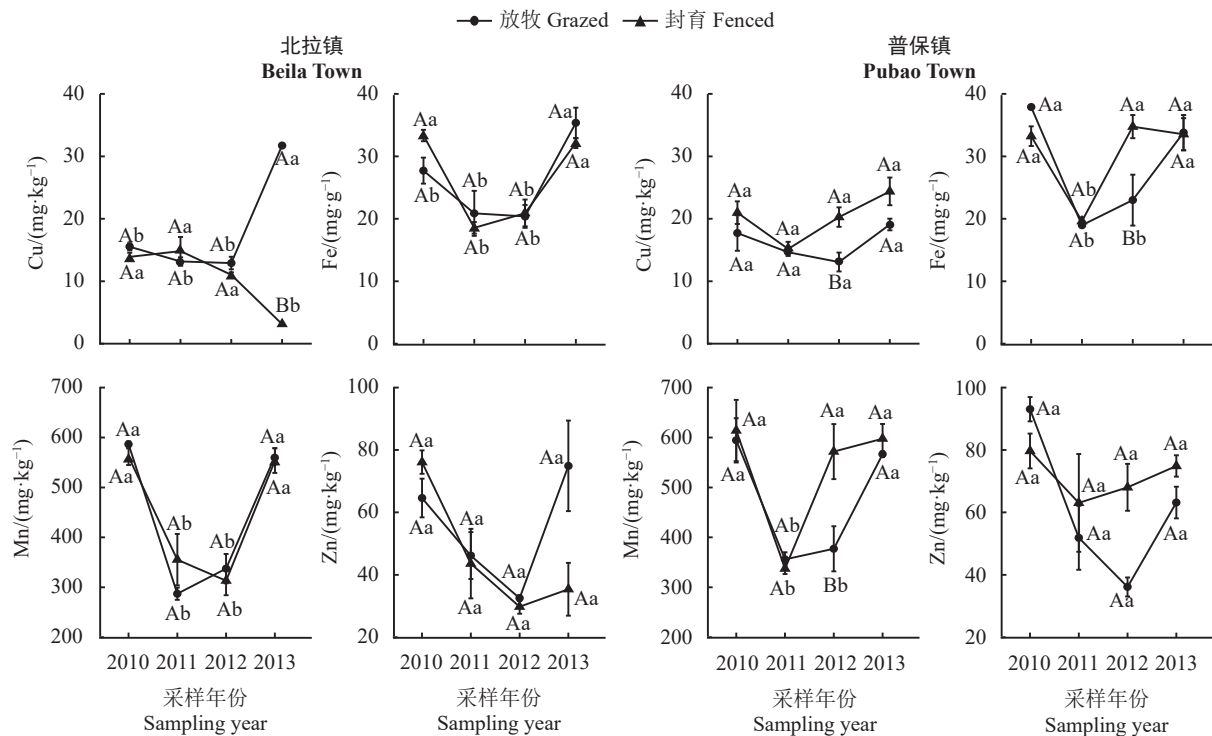


图 2 各采样年份矿质微量元素含量
Figure 2 Mineral trace element contents in each sampling year

表 2 围栏、样地、年份及其交互作用对土壤矿质元素影响的混合效应模型分析
Table 2 Effects of fencing, site, year, and their interactions on soil mineral elements from mixed-effect model analysis

因素 Factor	F/P	钙 Ca	铜 Cu	铁 Fe	镁 Mg	锰 Mn	锌 Zn
围栏 Fence	F	34.26	5.72	0.75	9.90	2.78	0.03
	P	< 0.01	0.02	0.39	< 0.01	0.10	0.85
样地 Site	F	0.79	4.42	0.57	2.42	0.79	0.12
	P	0.38	0.04	0.45	0.13	0.38	0.73
年份 Year	F	0.23	2.10	2.65	2.31	3.86	0.12
	P	0.87	0.12	0.06	0.09	0.02	0.95
围栏 × 样地 Fence × site	F	30.96	62.26	0.55	19.29	2.32	2.94
	P	< 0.01	< 0.01	0.46	< 0.01	0.14	0.09
围栏 × 年份 Fence × year	F	9.08	20.44	2.41	10.28	1.11	1.19
	P	< 0.01	< 0.01	0.08	< 0.01	0.36	0.33
样地 × 年份 Site × year	F	0.11	0.29	0.25	0.31	0.23	0.00
	P	0.95	0.83	0.86	0.82	0.88	1.00
围栏 × 样地 × 年份 Fence × site × year	F	5.37	30.08	3.00	2.70	3.85	1.89
	P	< 0.01	< 0.01	0.04	0.06	0.02	0.15

显著 ($P < 0.05$)。仅土壤 Cu 含量在不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)，仅土壤 Mn 含量在不同采样年份间差异显著 ($P < 0.05$)；任何一项因素对 Zn 无显著影响 ($P > 0.05$)。围栏内外表层土壤中，Fe 含量最高，

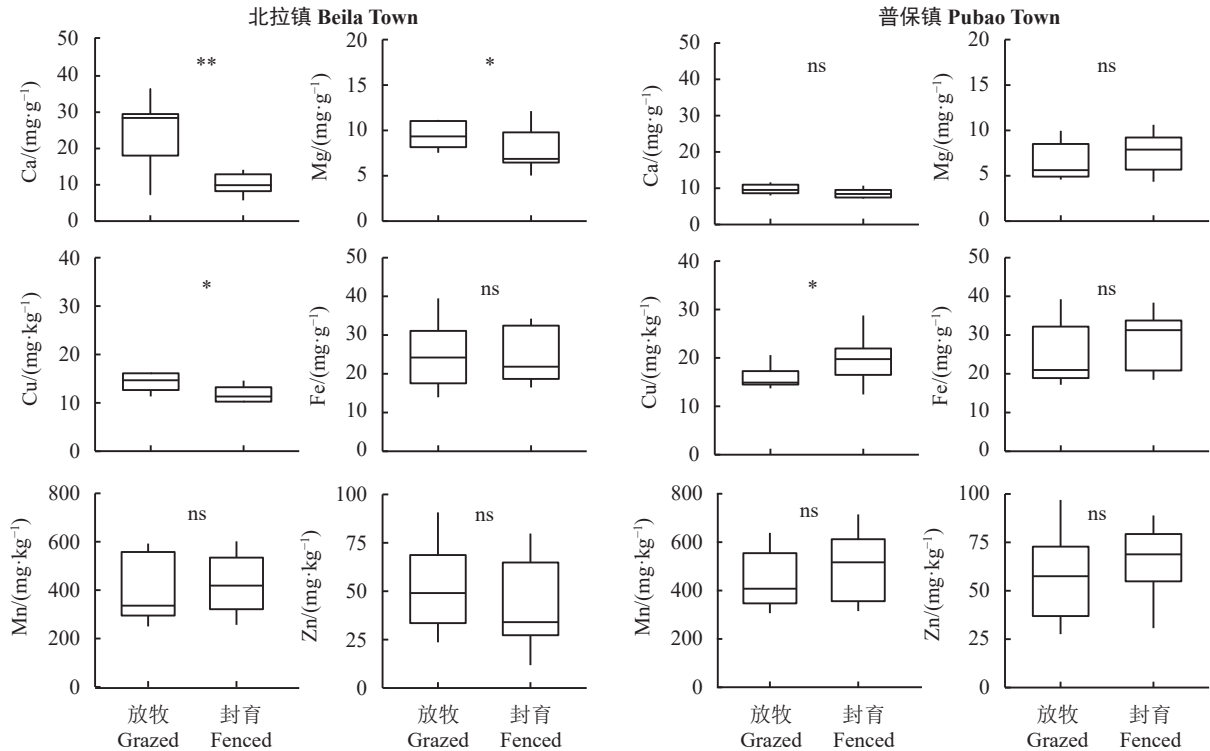


图 3 各样地围栏内外矿质元素含量统计

Figure 3 Mineral element contents inside and outside the fences of each site

*和**分别表示同一样地围栏内外差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$); ns 表示差异不显著 ($P > 0.05$); 图 5、图 6 同。

* and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively; ns indicates non-significant differences at the 0.05 level, for a given element between within and outside fences; this is applicable for Figure 5 and Figure 6 as well.

Cu 含量最低, 各元素含量从高到低排序为 $\text{Fe} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$ (图 3)。

2.2 围栏封育对植物群落特征的影响

围栏内外地上生物量年际变化无明显规律。围栏内外地上生物量及 Shannon-Wiener 指数相对大小无一致规律 (图 4)。2013 年普保镇围栏内地上生物量 ($78.48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 比围栏外 ($41.48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 高 89.2% ($P < 0.05$), 其他封育年份围栏内外地上生物量及 Shannon-Wiener 指数均无显著差异 ($P > 0.05$) (图 4)。仅 2012 年北拉镇封育样地的地上生物量与 2011 年相比差异显著, 2011–2012 年和 2012–2013 年普保镇放牧样地的 Shannon-Wiener 指数年际变化显著 ($P < 0.05$), 其他年份间地上生物量及 Shannon-Wiener 指数的变化均不显著 ($P > 0.05$)。

与放牧地相比, 围栏封育对地上生物量的影响显著 ($P < 0.05$) (表 3)。其中, 围栏封育仅在普保镇对地上生物量有显著影响 (增加了 43.8%) (图 5)。围栏 $\times$ 样地、围栏 $\times$ 年份及围栏、样地和年份三者的交互作用对地上生物量的影响显著 ($P < 0.05$) (表 3)。

仅围栏 $\times$ 年份的交互作用对物种多样性有显著影响。但与放牧样地相比, 围栏封育对两个样地物种多样性没有显著影响 ($P > 0.05$) (图 5)。

2.3 气候特征、群落特征和土壤矿质元素间的关系

相关性分析显示, 生长季气温与地上生物量和多样性分别极显著负相关和极显著正相关, 生长季降水与地上生物量和多样性分别极显著正相关和极显著负相关 ($P < 0.01$) (图 6)。生长季气温与各矿质元素极显著正相关, 但生长季降水与各矿质元素显著负相关。与生长季降水相比, 生长季气温与矿质元素的相关系数绝对值更大。各矿质元素之间, Ca 与 Mg、Cu 与 Zn、Mn 与 Zn、Fe 与 Mg、Mn 和 Zn 之间极显著正相关 ($P < 0.01$)。仅土壤 Mg 与地上生物量显著负相关 ($P < 0.05$), 但围栏内或围栏外地上生物量随土壤矿质元素含量增加变化不显著 ($P > 0.05$) (图 7)。土壤矿质元素与物种多样性均无显著关系 ($P > 0.05$) (图 6), 但围栏外物种多样性随土壤 Zn 含量增加呈先减小后增加的趋势, 且变化显著 ($P < 0.05$) (图 8)。

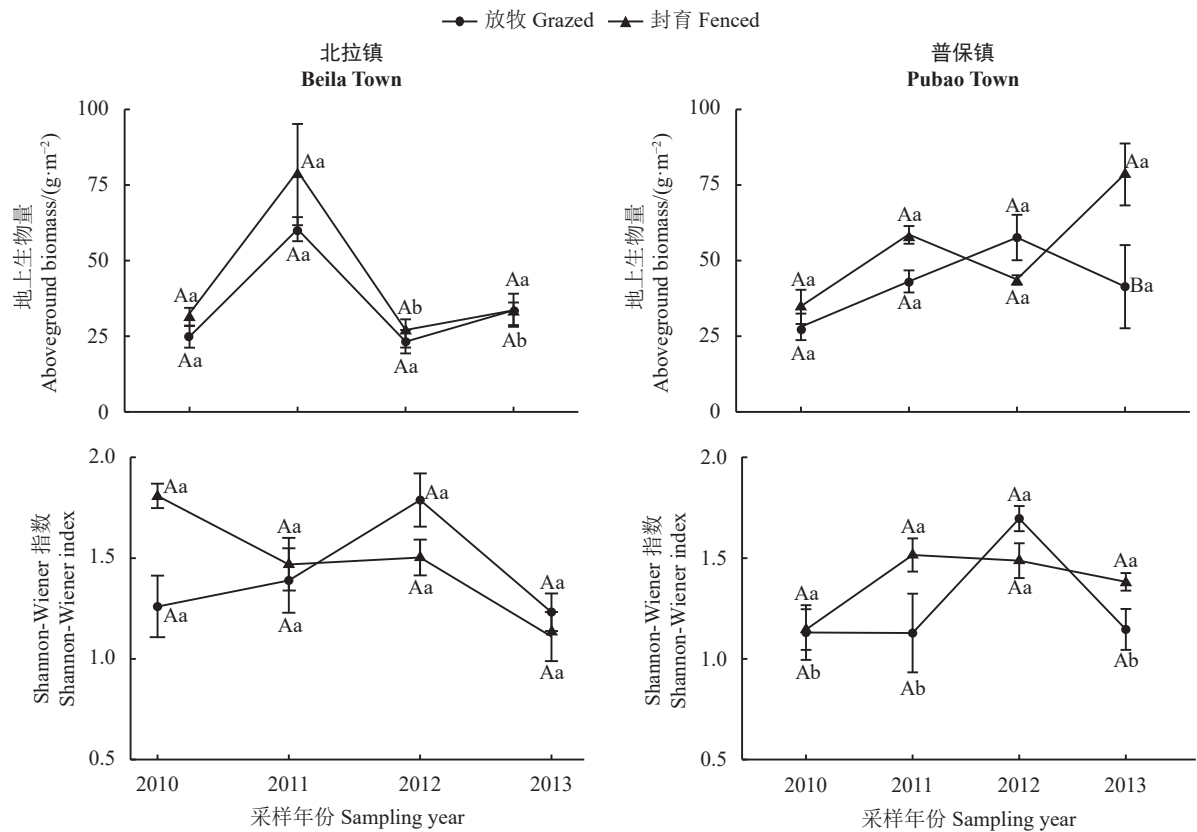


图 4 各采样年份地上生物量及 Shannon-Wiener 指数
Figure 4 Aboveground biomass and Shannon-Wiener index in each sampling year

表 3 围栏、样地、年份及其交互作用对群落特征影响的混合效应模型分析
Table 3 Effects of fencing, site, year, and their interactions on plant community characteristics from mixed-effect model analysis

因素 Factor	地上生物量 Aboveground biomass		Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	
	F	P	F	P
围栏 Fence (F)	34.26	< 0.01	1.57	0.21
样地 Site (S)	0.77	0.39	0.44	0.51
年份 Year (Y)	0.23	0.88	0.93	0.43
F × S	30.96	< 0.01	0.16	0.69
F × Y	9.08	< 0.01	3.39	0.02
S × Y	0.11	0.95	0.35	0.79
F × S × Y	5.37	< 0.01	2.48	0.07

以各矿质元素为协变量进行分析,结果显示围栏封育对高寒草原地上生物量和物种多样性无显著影响 ($P > 0.05$) (表 4)。仅土壤 Mg 对地上生物量

有显著影响 ($P < 0.05$), 围栏封育与土壤 Zn 的交互作用对物种多样性有显著影响, 其他土壤矿质元素及其与围栏封育的交互作用对地上生物量和物种多样性均无显著影响 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 围栏封育对土壤矿质元素含量的影响

矿质元素是土壤养分重要成分, 其含量和分布与母质类型、成土过程、土壤理化性质、土地利用方式和环境污染等因素有关^[35]。在青藏高原退化草地和内蒙古典型草原的研究发现, 围栏封育会降低部分样地表层土壤 Ca、Mg 和 Cu 的含量^[36-38]。与前人研究相似, 本研究在北拉镇的结果表明, 高寒草原实施 5~8 年围栏封育后表层土壤 Ca、Mg 和 Cu 的含量显著低于自由放牧样地土壤。这可能是因为家畜排泄物含有 Ca 元素^[39], 且 Ca 与 Mg 相关性较强 (表 3), 造成围栏外土壤 Ca 和 Mg 含量偏高; 另外, 在本研究中研究区域每公顷草的放牧强度小于 1 只羊^[40], 放牧强度不高, 没有对土壤养分造成过度破

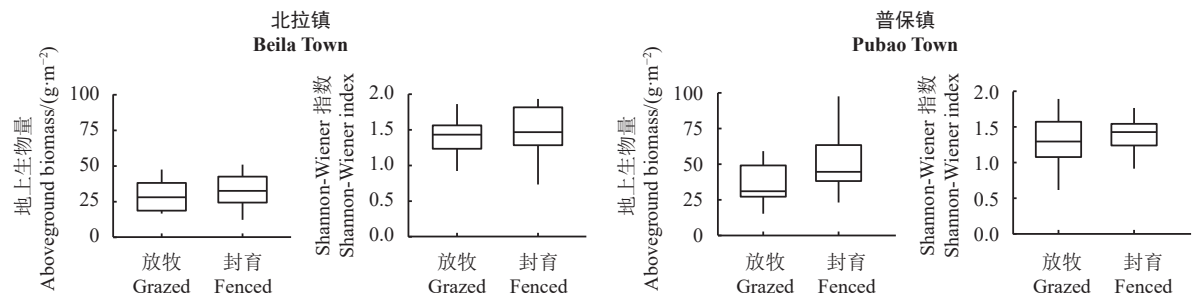


图 5 各样地围栏内外地上生物量及 Shannon-Wiener 指数

Figure 5 Aboveground biomass and Shannon-Wiener index inside and outside the fences of each site

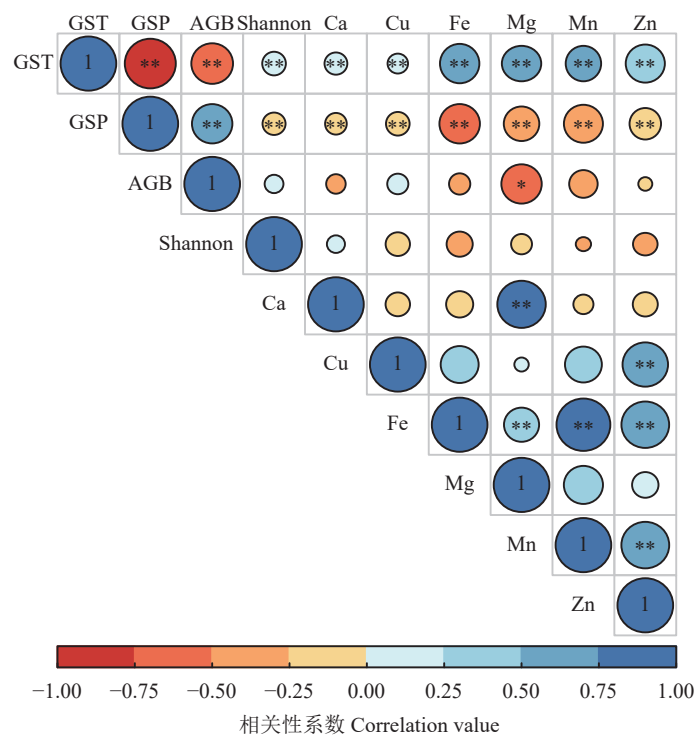


图 6 气候因子、群落特征与土壤矿质元素之间的相关系数矩阵图

Figure 6 Correlation coefficient matrix of climatic variables, plant community regimes and soil mineral elements

GST: 生长季气温; GSP: 生长季降水; AGB: 地上生物量; Shannon: 香农-威纳指数; *和**分别表示相关性在 0.05 和 0.01 水平显著; 图 7、图 8 同。

GST: growing season temperature; GSP: growing season precipitation; AGB: aboveground biomass; Shannon: Shannon-Wiener index; * and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively; this is applicable for Figure 7 and Figure 8 as well.

坏,这可能更有利于土壤养分循环和肥力保持^[41-42]。

此外,实施围栏封育后普保镇地土壤 Cu 含量增加了 23.5%。这与杨红善等^[43]在肃南县山地草原的研究一致。他们的研究发现禁牧使 0 – 10 cm 土层 Cu 含量增加了 13%。排除牲畜对草地植物的采食与践踏后,围栏封育可能降低土壤容重,增加植被盖度和高度,提高土壤持水能力,促进有机质和凋落物分解^[44-45],进而改善土壤矿质元素含量。

本研究发现 8 年围封没有显著改善高寒草原表

层土壤 Fe、Mn 和 Zn 的含量。这与在青藏高原东北部的研究^[46]相似,高寒草甸土壤微量元素含量也不受围栏封育的影响。藏北地区气候寒冷干燥,且本研究封育时间较短。这可能会限制土壤中矿物质分解速率^[47],影响土壤微量元素有效性。另外,班戈县土壤砂粒较多^[48],对微量元素吸附能力较差,造成微量元素易被淋溶,从而限制了土壤养分的恢复。

高寒草原表层土壤 Mn 含量在不同年份间差异显著,其他矿质元素含量在各年间无显著差异(表 2)。

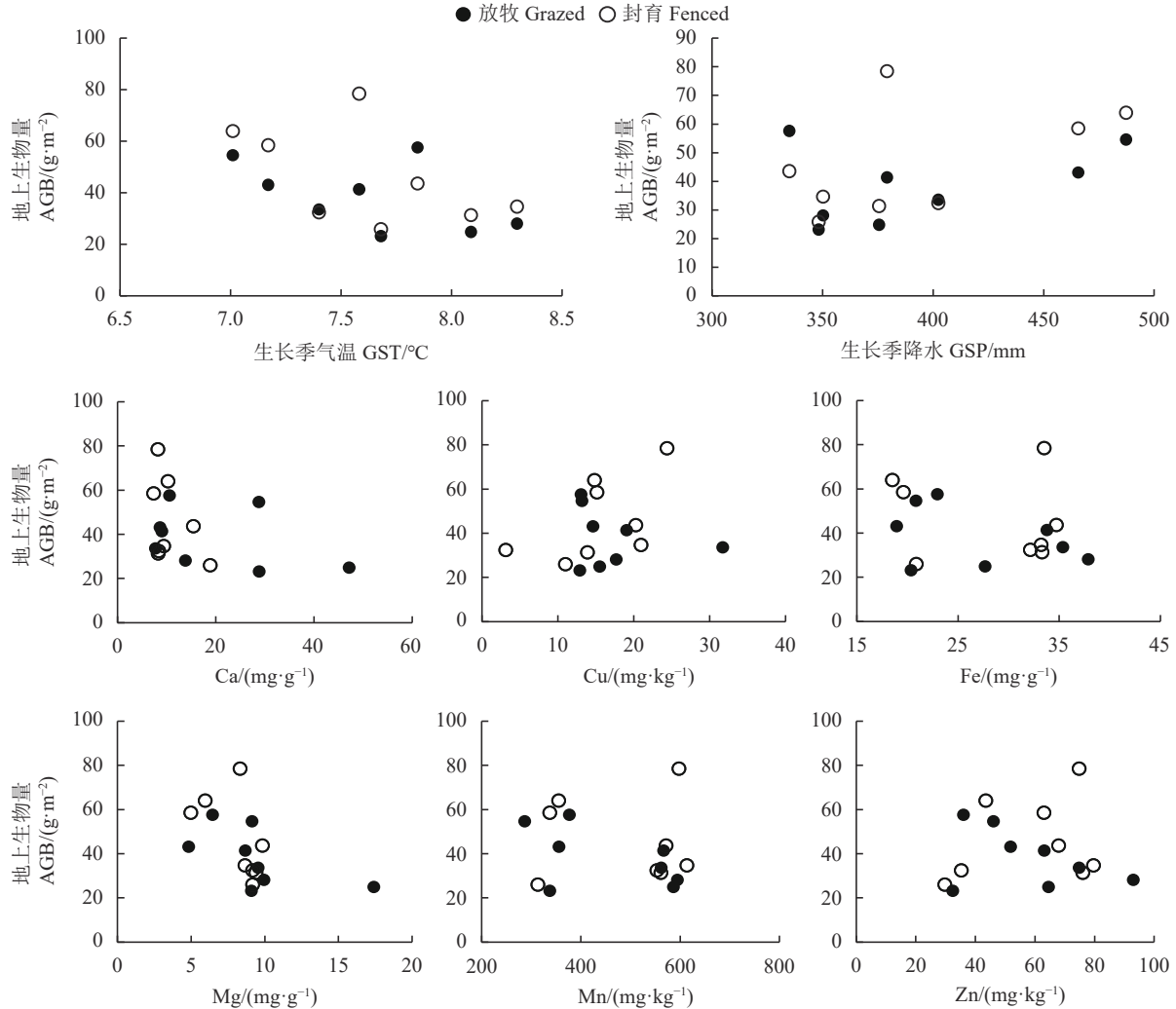


图7 地上生物量与气候变量和土壤矿质元素的关系

Figure 7 Relationships of aboveground with climatic variables and soil mineral element contents

可能是各样地每年的降水和气温有差异,并且与其他矿质元素相比,Mn与气候因素的相关性更强(图6),意味着土壤中Mn含量更容易受到气候的影响^[49]。

3.2 围栏封育对群落特征的影响

气候变化和人类活动引起草地退化,对植物群落的影响往往表现为生物量下降,物种多样性降低等^[1]。为了恢复退化草地,人们常采用围栏封育等方法^[2]。围栏是提高草地地上生物量的有效途径^[6-7]。与前人结果研究相似,本研究发现5~8年的围栏封育增加了普保镇地上生物量。这可能是因为排除放牧压力后消除了食草动物对植物的干扰,植被高度和盖度增加,光合效率随之增加,从而生物量得到恢复。

对退化草地实施围栏,消除了外界干扰源,对生物量和物种多样性的增加有积极作用^[12],但关于围

栏封育对地上生物量和群落多样性的影响仍存在争议。有研究发现地上生物量和物种多样性并未随着封育时间增加而持续增加^[13,50]。一项在内蒙古典型草原的研究表明^[50],较短期封育(2年和7年)并未使群落多样性得到显著恢复。相似地,在本研究中,围栏封育未显著增加北拉镇地上生物量和班戈县植被多样性。不同研究地点放牧历史和放牧率不同,这可能导致物种多样性对围栏封育的响应不同^[51]。藏北高原海拔高、气温低,可能使植被收到水分或氮的限制,从而限制了植被生长和物种多样性的恢复^[52]。

3.3 矿质元素对群落特征的影响

矿质元素的组成与含量对植物个体生长发育、群落动态演替与生态系统服务功能发挥具有关键调控作用^[53]。在对甘肃5种类型草地的研究^[54]中发

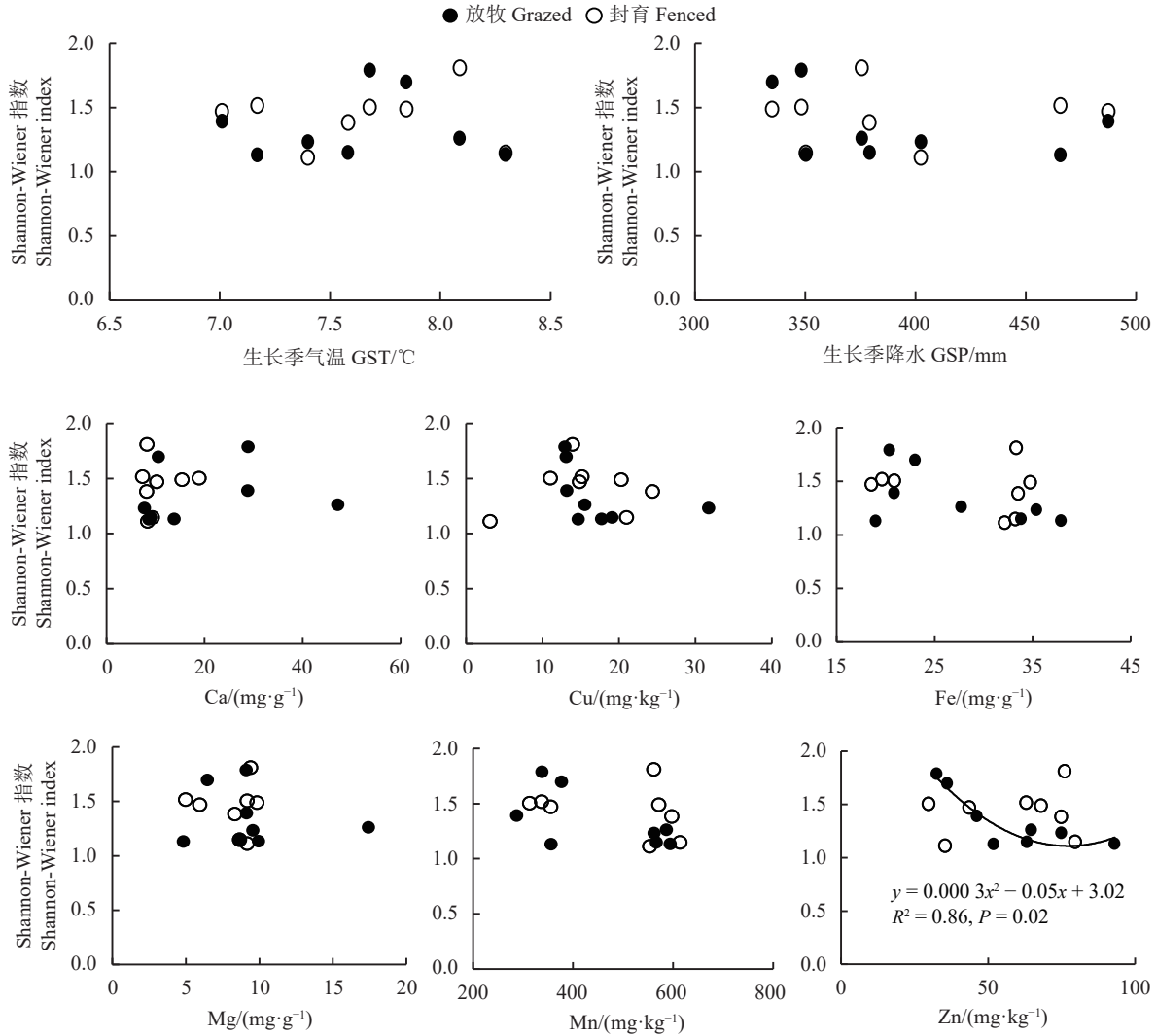


图 8 Shannon-Wiener 指数与气候变量和土壤矿质元素的关系

Figure 8 Relationships of the Shannon-Wiener index with climatic variables and soil mineral element contents

现, 土壤微量元素对植被特征 (盖度、高度和生物量) 有重要影响, 尤其是 Mg 和 Zn。本研究所测土壤 Mg 含量约为 $8.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 高于其他在青藏高原进行的研究^[55]。围栏封育显著改变了土壤 Mg 含量, 土壤 Mg 对地上生物量有显著负影响。

本研究所测土壤 Zn 含量为 $29.78 \sim 79.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于我国土壤 Zn 含量平均值^[56] ($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 围栏封育未显著改变高寒草原土壤 Zn 含量, 土壤 Zn 含量与地上生物量无显著影响, 但围栏封育与土壤 Zn 的交互作用对物种多样性有显著影响。研究区域土壤砂粒土含量多且偏碱性, 容易缺乏微量元素^[57]。土壤矿质微量元素对草地生产力存在潜在的调控作用^[26], 围栏封育可能通过影响土壤矿质元素对生物量物种多样性等群落特征产生间接影响。因此,

在草地恢复过程中, 除关注土壤养分和常见理化性质外, 还应关注研究较少的矿质元素 (特别是 Mg 和 Zn) 在土壤和地上植被中的含量, 从而更全面地探讨围栏封育等恢复措施对草地生态的恢复机制。

4 结论

本研究分析了围栏封育对藏北高寒草原植物群落特征和土壤矿质元素含量的影响。5~8 年的围栏封育只显著改变了表层土壤 Ca、Mg 和 Cu 的含量, 没有显著改变土壤中 Fe、Mn 和 Zn 的含量。围栏封育只显著增加了普保镇地上生物量, 对两个样地植物物种多样性均无显著影响。在各土壤矿质元素中, 仅 Mg 与地上生物量存在显著相关性。这可

表 4 地上生物量和物种多样性的协方差分析
Table 4 Results of ANCOVA models for above-ground biomass and biodiversity

自变量 Independent variables	地上生物量 Above-ground biomass			Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index		
	Sum Sq	F	P	Sum Sq	F	P
围栏 Fence	47.164	0.184	0.675	0.048	0.736	0.408
钙 Ca	542.507	2.117	0.171	0.009	0.143	0.712
围栏 × 钙 Fence × Ca	253.450	0.989	0.340	0.001	0.015	0.904
围栏 Fence	306.279	1.287	0.279	0.019	0.318	0.583
铜 Cu	137.543	0.578	0.462	0.031	0.511	0.488
围栏 × 铜 Fence × Cu	618.012	2.597	0.133	0.071	1.172	0.300
围栏 Fence	278.314	0.972	0.344	0.036	0.645	0.438
铁 Fe	195.176	0.681	0.425	0.119	2.157	0.168
围栏 × 铁 Fence × Fe	6.929	0.024	0.879	0.031	0.556	0.470
围栏 Fence	73.961	0.366	0.556	0.019	0.282	0.605
镁 Mg	1 107.643	5.485	0.037	0.017	0.249	0.627
围栏 × 镁 Fence × Mg	312.639	1.548	0.237	0.000	0.000	0.993
围栏 Fence	298.465	1.074	0.320	0.045	0.869	0.370
锰 Mn	159.032	0.572	0.464	0.154	2.974	0.110
围栏 × 锰 Fence × Mn	125.275	0.451	0.515	0.026	0.506	0.491
围栏 Fence	244.497	0.891	0.364	0.029	0.684	0.424
锌 Zn	0.396	0.001	0.970	0.097	2.268	0.158
围栏 × 锌 Fence × Zn	379.778	1.384	0.262	0.206	4.807	0.049

自变量自由度均为1。
The degree of freedom of each independent variable is 1.

能是因为围栏封育对高寒草原土壤矿质元素含量和植物群落的恢复效果有限。建议设置长期固定样地探究围栏封育下土壤矿质元素变化对草地生态系统功能的调控机制。

参考文献 References:

[1] HARRIS R M B, LOEFFLER F, RUMM A, FISCHER C, HORCHLER P, SCHOLZ M, FOECKLER F, HENLE K. Biological responses to extreme weather events are detectable but difficult to formally attribute to anthropogenic climate change. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14067.

[2] 张骞, 马丽, 张中华, 徐文华, 周秉荣, 宋明华, 乔安海, 王芳, 余延娣, 杨晓渊, 郭婧, 周华坤. 青藏高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望. *生态学报*, 2019, 39(20): 7441-7451.
ZHANG Q, MA L, ZHANG Z H, XU W H, ZHOU B R, SONG M H, QIAO A H, WANG F, SHE Y D, YANG X Y, GUO J, ZHOU H K. Ecological restoration of degraded grassland in Qinghai-Tibet alpine region: Degradation status, restoration measures, effects and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7441-7451.

[3] DONG S K, SHANG Z H, GAO J X, BOONE R B. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 287(C): 10668.

- [4] LIU X, MA Z W, HUANG X T, LI L H. How does grazing exclusion influence plant productivity and community structure in alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01066.
- [5] WANG L, GAN Y T, WIESMEIER M, ZHAO G Q, ZHANG R Y, HAN G D, SIDDIQUE K H M, HOU F J. Grazing exclusion-An effective approach for naturally restoring degraded grasslands in Northern China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(12): 4439-4456.
- [6] 赵景学, 祁彪, 多吉顿珠, 尚占环. 短期围栏封育对藏北 3 类退化高寒草地群落特征的影响. *草业科学*, 2011, 28(1): 59-62.
ZHAO J X, QI B, Duoqidunzhu, SHANG Z H. Effects of short-term enclosure on the community characteristics of three types of degraded alpine grasslands in the north Tibet. *Pratacultural Science*, 2011, 28(1): 59-62.
- [7] FEDRIGO J K, ATAIDE P F, AZAMBUJA FILHO J, OLIVEIRA L V, JAURENA M, LACA E A, OVERBECK G E, NABINGER C. Temporary grazing exclusion promotes rapid recovery of species richness and productivity in a long-term overgrazed Campos grassland. *Restoration Ecology*, 2018, 26(4): 677-685.
- [8] DU C J, GAO Y H. Grazing exclusion alters ecological stoichiometry of plant and soil in degraded alpine grassland. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2021, 308: 107256.
- [9] WANG Z, ZHANG Q, STALEY C, GAO H L, ISHII S, WEI X R, LIU J, CHENG J M, HAO M D, SADOWSKY M J. Impact of long-term grazing exclusion on soil microbial community composition and nutrient availability. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(2): 121-134.
- [10] 李媛媛, 董世魁, 李小艳, 温璐. 围栏封育对黄河源区退化高寒草地植被组成及生物量的影响. *草地学报*, 2012, 20(2): 275-279, 286.
LI Y Y, DONG S K, LI X Y, WEN L. Effect of grassland enclosure on vegetation composition and production in headwater of Yellow River. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(2): 275-279, 286.
- [11] 毛绍娟, 吴启华, 祝景彬, 李红琴, 张法伟, 李英年. 藏北高寒草原群落维持性能对封育年限的响应. *草业学报*, 2015, 24(1): 21-30.
MAO S J, WU Q H, ZHU J B, LI H Q, ZHANG F W, LI Y N. Response of the maintain performance in alpine grassland to enclosure on the Northern Tibetan Plateau. *Acta Pratacultural Sinica*, 2015, 24(1): 21-30.
- [12] 赵彩霞, 郑大玮, 何文清, 潘志华, 胡跃高, 樊秀荣. 不同围栏年限冷蒿草原群落特征与土壤特性变化的研究. *草业科学*, 2006, 23(12): 89-92.
ZHAO C X, ZHENG D W, HE W Q, PAN Z H, HU Y G, FAN X R. Study on plant community characters and soil properties of *Artemisia frigida* grasslands after different enclosing times. *Pratacultural Science*, 2006, 23(12): 89-92.
- [13] 刘晓琴, 张翔, 张立锋, 李英年, 赵亮, 徐世晓, 李红琴, 马荣荣, 牛犇, 高玉葆, 古松. 封育年限对高寒草甸群落组分和物种多样性的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5150-5162.
LIU X Q, ZHANG X, ZHANG L F, LI Y N, ZHAO L, XU S X, LI H Q, MA R R, NIU B, GAO Y B, GU S. Effects of enclosure duration on the community structure and species diversity of an alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5150-5162.
- [14] YAO X X, WU J P, GONG X Y, LANG X, WANG C L, SONG S Z, AHMAD A A. Effects of long term fencing on biomass, coverage, density, biodiversity and nutritional values of vegetation community in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering*, 2019, 130: 80-93.
- [15] 杨振安, 姜林, 徐颖怡, 詹伟, 朱二雄, 陈槐. 青藏高原高寒草甸植被和土壤对短期禁牧的响应. *生态学报*, 2017, 37(23): 7903-7911.
YANG Z A, JIANG L, XU Y Y, ZHAN W, ZHU E X, CHEN H. Responses of vegetation and soil of alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau to short-term grazing prohibition. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7903-7911.
- [16] WU G L, LIU Z H, ZHANG L, CHEN J M, HU T M. Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of western China. *Plant and Soil*, 2010, 332(1-2): 331-337.
- [17] DAI L C, FU R Y, GUO X W, DU Y G, LIN L, ZHANG F W, LI Y K, CAO G M. Long-term grazing exclusion greatly improve carbon and nitrogen store in an alpine meadow on the northern Qinghai-Tibet Plateau. *Catena*, 2021, 197: 104955.
- [18] 尹亚丽, 王玉琴, 李世雄, 刘燕, 赵文, 马玉寿, 鲍根生. 围封对退化高寒草甸土壤微生物群落多样性及土壤化学计量特征的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 127-136.

- YIN Y L, WANG Y Q, LI S X, LIU Y, ZHAO W, MA Y S, BAO G S. Effects of enclosing on soil microbial community diversity and soil stoichiometric characteristics in a degraded alpine meadow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(1): 127-136.
- [19] LU X Y, YAN Y J, SUN J X, ZHANG X, CHEN Y, WANG X, CHENG G. Short-term grazing exclusion has no impact on soil properties and nutrients of degraded alpine grassland in Tibet, China. *Solid Earth*, 2015, 6(4): 1195-1205.
- [20] 江胜德, 郭兰, 王邝佳, 杨兰兰. L-谷氨酸对白芨组培苗叶绿素含量·矿质元素吸收及生长的影响. *安徽农业科学*, 2015, 43(20): 143-145.
- JIANG D S, GUO L, WANG K J, YANG L L. Effects of L-glutamic acid on the chlorophyll content·mineral elements absorption and growth of tissue culture seedlings of *Bletilla striata*. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2015, 43(20): 143-145.
- [21] 薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 罗雪华, 王大鹏, 张永发, 邹碧霞. 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展. *土壤*, 2019, 51(1): 1-10.
- XUE X X, WU X P, WANG W B, LUO X H, WANG D P, ZHANG Y F, ZOU B X. Progress of potassium, magnesium and their interaction in plant-soil system. *Soils*, 2019, 51(1): 1-10.
- [22] 田春丽. 硒与锌对紫花苜蓿生长及品质的调控作用及其机理. 郑州: 河南农业大学博士学位论文, 2014.
- TIAN C L. Regulation of selenium and zinc on growth and quality of alfalfa and its mechanisms. PhD Thesis. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [23] 沙洁, 陈垣, 郭凤霞, 白刚, 周传猛. 外源 Ca^{2+} 调控野生抚育独一味幼株抗寒生理特性的研究. *草业学报*, 2020, 29(2): 11-21.
- SHA J, CHEN Y, GUO F X, BAI G, ZHOU C M. A study of exogenously applied Ca^{2+} to control physiological characteristics of cold tolerance for wild fostered *Lamiophlomis rotata* seedlings. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(2): 11-21.
- [24] 王兴. 冬小麦东农冬麦1号抗寒拌种剂的研制与应用. 哈尔滨: 东北农业大学博士学位论文, 2015.
- WANG X. Development and application of cold resistant dressing agent of dongnongdongmai 1. PhD Thesis. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.
- [25] 张建鹏, 李玉强, 赵学勇, 张铜会, 余倩楠, 刘敏, 魏水莲. 围封对沙漠化草地土壤理化性质和固碳潜力恢复的影响. *中国沙漠*, 2017, 37(3): 491-499.
- ZHANG J P, LI Y Q, ZHAO X Y, ZHANG T H, SHE Q N, LIU M, WEI S L. Effects of enclosure on soil physicochemical properties and carbon sequestration potential recovery of desertified grassland. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(3): 491-499.
- [26] RADUJKOVIC D, VERBRUGGEN E, SEABLOOM, E W, BAHN M, BIEDERMAN L A, BORER E T, BOUGHTON E H, CATFORD J A, CAMPIOLI M, DONOHUE I, EBELING A, ESKELINEN A, FAY P A, HANSART A, KNOPS J M H, MACDOUGALL A S, OHLERT T, VENTERINK H O, RAYNAUD X, RISCH A C, ROSCHER C, SCHUTZ M, SILVEIRA M L, STEVENS C J, VAN SUNDERT K, VIRTANEN R, WARDLE G M, WRAGG P D, VICCA S. Soil properties as key predictors of global grassland production: Have we overlooked micronutrients? *Ecology Letters*, 2021, 24(12): 2713-2725.
- [27] 西藏自治区农牧厅. 西藏自治区草原资源与生态统计资料. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- Tibet Autonomous Region Agricultural and Pastoral Office. Statistics of Grassland Resources and Ecology in Tibet Autonomous Region. Beijing: China Agriculture Press, 2017.
- [28] 冯云飞, 李猛, 李少伟, 邸迎伟, 沈振西, 张宪洲, 余成群, 严俊, 席永士, 武建双. 2010-2017年藏北高寒退化草地禁牧恢复效果评价. *草业科学*, 2019, 36(4): 1148-162.
- FENG Y F, LI M, LI S W, DI Y W, SHEN Z X, ZHANG X Z, YU C Q, YAN J, XI Y S, WU J S. Effectiveness of grazing exclusion on the restoration of degraded alpine grasslands on the Northern Tibetan Plateau from 2010 to 2017. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 1148-162.
- [29] 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 江村旺扎, 盛文萍, 王宝山, 李文福, 李颖, 郝向伟. 近期藏北地区草地景观结构及其变化特征分析. *中国农业气象*, 2008, 29(3): 333-337.
- GAO Q Z, WAN Y F, LI Y E, Jiangcunwangzha, SHENG W P, WANG B S, LI W F, LI Y, HAO X W. Landscape structure and changes of grassland in northern Tibet in the recent ten years. *Chinese Journal of Agrome teorology*, 2008, 29(3): 333-337.
- [30] 董俊夫, 王淑平, 崔晓勇, 庞哲, 赵国强, 许宁, 汪诗平. 增施氮肥对青藏高寒草原不同类群植物群落特征的影响. *草业科学*, 2016, 33(11): 2291-2299.
- DONG J F, WANG S P, CUI X Y, PANG Z, ZHAO G Q, XU N, WANG S P. Effects of nitrogen addition on plant community

- characteristics in Tibetan alpine grassland. *Pratacultural Science*, 2016, 33(11): 2291-2299.
- [31] MCSHERRY M E, RITCHIE M E. Effects of grazing on grassland soil carbon: A global review. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1347-1357.
- [32] LI X J, ZHANG X Z, WU J S, SHEN Z X, ZHANG Y J, XU X L, FAN Y Z, ZHAO Y P, YAN W. Root biomass distribution in alpine ecosystems of the northern Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(7): 1911-1919.
- [33] 辛国省, 胡征, 周围, 杨志强, 郭旭升, 龙瑞军. 微波密闭消解 ICP-AES 法测定土-草-畜系统中无机元素. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 546-550.
- XIN G S, HU Z, ZHOU W, YANG Z Q, GUO X S, LONG R J. Spectroscopy and spectral analysis, 2010, 30(2): 546-550.
- [34] R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. (2021-03-31) [2021-12-04]. <https://www.R-project.org/>.
- [35] 邓邦良, 袁知洋, 郭晓敏. 武功山草甸土壤微量元素分布及对人为干扰的响应. *草业科学*, 2015, 32(10): 1555-1560.
- DENG B L, YUAN Z Y, GUO X M. Microelement distributions and responses to human disturbance in meadow soil of Wugong Mountain. *Pratacultural Science*, 2015, 32(10): 1555-1560.
- [36] 李天才, 陈桂琛, 曹广民, 张德罡. 青海湖北岸退化草地和封育草地中钾、钙、镁等矿质常量元素特征. *草地学报*, 2011, 19(5): 752-759.
- LI T C, CHEN G C, CAO G M, ZHANG D G. Characteristics of mineral elements K, Ca, Mg in degraded grassland and enclosure grassland on the north bank of Qinghai Lake. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(5): 752-759.
- [37] 李天才, 曹广民, 柳青海, 周国英, 师生波, 张德罡. 青海湖北岸退化与封育草地土壤与优势植物中四种微量元素特征. *草业学报*, 2012, 21(5): 213-221.
- LI T C, CAO G M, LIU Q H, ZHOU G Y, SHI S B, ZHANG D G. Characteristics of four trace elements in soil and dominant plants from degraded grassland, enclosed grassland on the north bank of Qinghai Lake. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(5): 213-221.
- [38] 贺海升. 不同管理模式对内蒙古典型草原土壤质量影响综合评价研究. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文, 2019.
- HE H S. Comprehensive soil quality evaluations of Inner Mongolia typical grassland under different management modes. PhD Thesis. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [39] 王君, 沙丽清. 滇西北藏区不同土地利用方式对土壤养分的影响. *东北林业大学学报*, 2007, 35(10): 45-47, 66.
- WANG J, SHA L Q. Effects of land use on soil nutrients in Tibetan region, northwest Yunnan, China. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(10): 45-47, 66.
- [40] WU J S, YANG P W, ZHANG X Z, SHEN Z X, YU C Q. Spatial and climatic patterns of the relative abundance of poisonous vs. non-poisonous plants across the Northern Tibetan Plateau. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(8): 491.
- [41] 高雪峰, 韩国栋, 张功, 赵萌莉, 卢萍. 荒漠草原不同放牧强度下土壤酶活性及养分含量的动态研究. *草业科学*, 2007, 24(2): 10-13.
- GAO X F, HAN G D, ZHANG G, ZHAO M L, LU P. Study on dynamics of soil enzyme activity and nutrient of desert steppe under different grazing intensities. *Pratacultural Science*, 2007, 24(2): 10-13.
- [42] 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.
- WANG Y H, HE X Y, ZHOU G S. Study on the responses of *Leymus chinensis* steppe to grazing in songnen plain. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10(1): 45-49.
- [43] 杨红善, 常根柱, 周学辉, 苗小林, 路远. 放牧对肃南山地草原土-草-畜养分及有效态微量元素的影响. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 103-107.
- YANG H S, CHANG G Z, ZHOU X H, MIAO X L, LU Y. Study on influence of grazing to nutrient and available trace elements in the soil-grass-animal on the mountain grassland of Su'nan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 103-107.
- [44] 肖金玉, 蒲小鹏, 徐长林. 禁牧对退化草地恢复的作用. *草业科学*, 2015, 32(1): 138-145.
- XIAO J Y, PU X P, XU C L. Effects of grazing prohibition on restoration of degraded grassland. *Pratacultural Science*, 2015, 32(1): 138-145.
- [45] JING Z B, CHENG J M, SU J S, BAI Y, JIN J W. Changes in plant community composition and soil properties under 3-decade grazing exclusion in semiarid grassland. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 171-178.
- [46] 张岩. 藏羊夏季和冬季轮牧对高寒生态系统植被、土壤和家畜的作用. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2016.
- ZHANG Y. Effects of summer and winter rotational grazing of Tibetan sheep on plant, soil and livestock of alpine ecosystem. PhD

- Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [47] 斯贵才, 袁艳丽, 王建, 王光鹏, 雷天柱, 张更新. 围封对当雄县高寒草原土壤微生物和酶活性的影响. *草业科学*, 2015, 32(1): 1-10.
SI G C, YUAN Y L, WANG J, WANG G P, LEI T Z, ZHANG G X. Effects of fencing on microbial communities and soil enzyme activities in Damxung alpine grassland. *Pratacultural Science*, 2015, 32(1): 1-10.
- [48] 万运帆, 高清竹, 林而达, 李玉娥, 秦晓波, 江村旺扎, 王宝山, 李文福. 西藏那曲地区草地植被及土壤养分状况调查. *草业科学*, 2006, 23(5): 7-11.
WAN Y F, GAO Q Z, LI E D, LI Y E, QIN X B, Jiangcunwangzha, WANG B S, LI W F. Investigation of grassland growth and soil nutrient situation in Naqu prefecture of Tibet. *Pratacultural Science*, 2006, 23(5): 7-11.
- [49] 吴彩霞, 傅华, 裴世芳, 秦燕. 不同草地类型土壤有效态微量元素含量特征. *干旱区研究*, 2008, 25(1): 137-144.
WU C X, FU H, PEI S F, QIN Y. Study on the contents of available trace elements in different grassland soils on the western slope of the Helan mountain. *Arid Zone Research*, 2008, 25(1): 137-144.
- [50] 闫玉春, 唐海萍. 围栏禁牧对内蒙古典型草原群落特征的影响. *西北植物学报*, 2007, 27(6): 1225-1232.
YAN Y C, TANG H P. Effects of enclosure on typical steppe community properties in Inner Mongolia. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(6): 1225-1232.
- [51] ZHAO J X, SUN F D, TIAN L H. Altitudinal pattern of grazing exclusion effects on vegetation characteristics and soil properties in alpine grasslands on the central Tibetan Plateau. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(2): 750-761.
- [52] WANG Z, LUO T X, LI R C, TANG Y H, DU M Y. Causes for the unimodal pattern of biomass and productivity in alpine grasslands along a large altitudinal gradient in semi-arid regions. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(1): 189-201.
- [53] 漆良华, 张旭东, 彭镇华, 范少辉, 周金星. 不同植被恢复模式下中亚热带黄壤坡地土壤微量元素效应. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 735-740.
QI L H, ZHANG X D, PENG Z H, FAN S H, ZHOU J X. Soil micro elements under different vegetation restoration patterns in yellow soil slope region of mid-subtropics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 735-740.
- [54] 李强, 柳小妮, 张德罡, 杨军银, 何国兴, 关文昊, 刘志刚, 纪童. 祁连山自然保护区不同草地类型地上生物量和土壤微量元素特征分析. *草原与草坪*, 2021, 41(3): 48-56.
LI Q, LIU X N, ZHANG D G, YANG J Y, HE G X, GUAN W H, LIU Z G, JI T. Characteristics of aboveground biomass and soil trace elements of different grassland types in Qilian Mountain reserve. *Grass Land and Turf*, 2021, 41(3): 48-56.
- [55] 辛国省, 龙瑞军, 尚占环, 丁路明, 郭旭生. 青藏高原东北缘放牧草地土壤矿物元素含量及分布特征. *草业学报*, 2012, 21(2): 8-17.
XIN G S, LONG R J, SHANG Z H, DING L M, GUO X S. Status of some selected major and trace elements in pasture soil from northeast of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Pratacultural Sinica*, 2012, 21(2): 8-17.
- [56] 胡自治, 文奋武, 卢泰安. 滩羊土-草-畜系统中的微量元素及其意义. *草业学报*, 1999(1): 61-65.
HU Z Z, WEN F W, LU T A. Micro elements and their meaning in soil-grass-animal system of Tan-Sheep. *Acta Pratacultural Sinica*, 1999(1): 61-65.
- [57] FAGERIA N K, BALIGAR V C, CIARK R B. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 2002(77): 185-268.

(责任编辑 张瑾)