

DOI: 10.20103/j.stxb.202309212049

王梓晗, 侯东杰, 王忠武, 吕世杰, 王海明, 韩国栋, 王恬, 范博. 载畜率对短花针茅荒漠草原灌木及其邻近土壤养分含量的影响. 生态学报, 2024, 44(10): 4263-4276.

Wang Z H, Hou D J, Wang Z W, Lü S J, Wang H M, Han G D, Wang T, Fan B. Effect of stocking rate on the shrubs and their adjacent soil nutrients in *Stipa breviflora* desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4263-4276.

载畜率对短花针茅荒漠草原灌木及其邻近土壤养分含量的影响

王梓晗¹, 侯东杰¹, 王忠武^{1,*}, 吕世杰¹, 王海明², 韩国栋¹, 王恬³, 范博⁴

1 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特市 010000

2 内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特市 010000

3 巴彦淖尔市农牧业局畜牧业服务中心, 巴彦淖尔市 015000

4 内蒙古优然牧业有限责任公司, 呼和浩特市 010000

摘要: 草地灌丛化现象在草地生态系统上广泛发生。放牧是人类利用草原的重要方式, 通过分析不同载畜率下荒漠草原灌木种群及其邻近土壤养分含量的变化, 可研究放牧干扰下不同灌木种群的耐牧特性, 对深入了解荒漠草原植物群落演替机制具有重要意义。以荒漠草原灌木小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)、半灌木驼绒藜 (*Ceratoides latens*) 及小半灌木冷蒿 (*Artemisia frigida*) 和木地肤 (*Kochia prostrata*) (下称为“灌木”) 为研究对象, 探究不同载畜率下各个灌木种群的数量、高度、盖度及地上生物量 (下称为“数量特征值”) 及其邻近土壤养分含量。结果表明: 冷蒿的数量特征值均随着载畜率的增加而降低, 其他植物种群的数量特征值均在 CK 或 LG 区出现最大值, 且不同灌木邻近土壤养分含量随着土壤深度的增加而下降 ($P < 0.05$)。不同灌木邻近土壤全氮含量随着载畜率增加而下降; 冷蒿邻近有机碳含量在 CK 区最高, 小叶锦鸡儿邻近速效磷含量在 HG 区最高, 其余灌木邻近有机碳、速效磷含量在 LG 区最高。灌木种群数量特征与土壤养分的关系为: 土壤有机碳与冷蒿和驼绒藜的高度、盖度、地上生物量呈正相关, 土壤速效磷与木地肤高度、地上生物量呈显著负相关。因此, 载畜率均会对灌木植物种群的数量特征值及其邻近土壤养分含量产生影响。

关键词: 荒漠草原; 灌木; 土壤养分; 相关关系; 冗余分析

Effect of stocking rate on the shrubs and their adjacent soil nutrients in *Stipa breviflora* desert steppe

WANG Zihan¹, HOU Dongjie¹, WANG Zhongwu^{1,*}, LÜ Shijie¹, WANG Haiming², HAN Guodong¹, WANG Tian³, FAN Bo⁴

1 College of Grassland, Resources and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010000, China

2 Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Science, Hohhot 010000, China

3 Animal Husbandry Service Center, Agriculture and Animal Husbandry Bureau, Bayannur 015000, China

4 Inner Mongolia Youran Animal Husbandry Co., Ltd, Hohhot 010000, China

Abstract: Shrub encroachment is widespread in grassland ecosystems. Grazing is an important way for human beings to use grassland. By analyzing the changes of shrub populations and their adjacent soil nutrient contents in desert steppe under different stocking rates, the grazing tolerance characteristics of different shrub populations under grazing disturbance can be studied, which is of great significance for understanding the succession mechanism of plant communities in desert steppe. In

基金项目: 内蒙古重大科技专项 (2021ZD0044); 国家自然科学基金项目 (31760143, 32260352); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2021MS03042)

收稿日期: 2023-09-21; **网络出版日期:** 2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzhongwu@imau.edu.cn

this paper, *Caragana microphylla*, *Ceratoides latens*, *Artemisia frigida* and *Kochia prostrata* (hereinafter referred to as “shrub”) were used as the research objects to explore the density, height, coverage and aboveground biomass (hereinafter referred to as “quantitative characteristic value”) of each plant population under different stocking rates and its adjacent soil nutrients. The results showed that the quantitative characteristics of *A. frigida* decreased with the increase of stocking rate, the quantitative characteristics of other plant populations showed the maximum value in No grazing or Light grazing treatment, and the soil nutrient content adjacent different shrubs decreased with the increase of soil depth ($P < 0.05$). The total nitrogen content adjacent different shrubs decreased with the increase of stocking rate. The organic carbon content adjacent *A. frigida* was the highest in CK treatment, the content of available phosphorus adjacent *C. microphylla* was the highest in HG treatment, and the content of organic carbon and available phosphorus adjacent other shrubs was the highest in LG treatment. The relationship between the quantitative characteristics of shrub population and soil nutrients was as follows: soil organic carbon was positively correlated with the height, coverage and aboveground biomass of *A. frigida* and *C. latens*, and soil available phosphorus was significantly negatively correlated with the height and aboveground biomass of *K. scoparia*. Therefore, the stocking rate can affect the quantitative characteristic value of shrub plant population and its adjacent soil nutrient content.

Key Words: desert steppe; shrub; soil nutrients; correlation; redundancy analysis

在天然草地生态系统中^[1-3],灌木往往被认为是入侵者,被认为是发生草地荒漠化的现象的主要原因^[4-5]。灌木下土壤资源部分聚集扩大了灌木的占地面积,促进土壤养分的积累,这种正反馈效应会加速形成草地荒漠化^[6],这种现象在受干旱气候或人为过度干扰的草地生态系统上更加严重。在内蒙古草原上却有不同发现,古琛认为灌木的地上生物量和载畜率之间呈负相关关系^[7]。王占文也有类似的研究结论,增加载畜率会降低灌木种群在群落中的比例,过高的载畜率甚至会使灌木种群消失^[8]。然而,有研究表明灌木在退化草地的恢复过程中起着独特而重要的作用。灌木可改变周围局部的生态环境,吸收空气中的尘土和植物凋落物所携带的养分和水分资源,使灌木周围植物和土壤养分降低,这就是人们所说的灌丛“沃岛效应”^[9]。灌木的存在增强了土壤的空间异质性,形成了土壤肥力资源聚集区和匮乏区,这可能会使植物和土壤营养元素的循环进程发生转变。灌木所积累的地上凋落物,延缓了有机质的分解和营养元素的循环,保护了土壤养分含量^[10]。因此有关草地灌丛化带来的正反馈和负反馈效应仍需深入探究。

植物生长会改变土壤养分,进而影响后期植物的生长性能,这就是植物—土壤反馈机制^[11]。尤其在资源受到限制时,地上植被会改变对原有环境的适应,进而影响土壤养分变化。刘忠宽等人对主要植物种群下的土壤的碳氮等含量进行了广泛研究,结果表明土壤养分对植物种群表现出较强的依赖性^[12]。孙世贤等人指出植物群落为了适应放牧强度的干扰,会淘汰群落中碳和氮含量较低的植物种群^[13]。安钰等认为适度放牧能够显著增加优势植物的养分含量,但植物与土壤养分之间相关性不大^[14]。由此可见,不同植物种群对土壤的反馈机制的影响不尽相同。

荒漠草原是内蒙古中西部地区主要的草原类型,具有极为脆弱的生态系统,加之人类超载放牧、过度开垦等活动,这已经造成了该生态系统产生不同程度的退化^[15-16]。灌木的产生对生态系统的影响一直是研究的热点问题,但在荒漠草原上进行调查的研究较少。为此本文以内蒙古短花针茅荒漠草原下的灌木小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、半灌木驼绒藜(*Ceratoides latens*)及小半灌木冷蒿(*Artemisia frigida*)和木地肤(*Kochia prostrata*)(下称为“灌木”)为研究对象,探究不同灌木种群的密度、高度、盖度及地上生物量(下称为“数量特征值”)及其邻近土壤养分对载畜率的响应,并研究植物与土壤之间的相关关系,研究结果有利于明确灌木在不同载畜率下的耐牧程度,进一步深入探究灌木的适应机制,为科学管理放牧草地和恢复重建退化草地提供关键的理论依据。

1 试验研究内容与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古自治区四子王旗王府一队,地理位置为 $41^{\circ}47'17''\text{N}$, $111^{\circ}53'46''\text{E}$, 平均海拔高度为 1450 m, 气候特点是春温骤升、秋温巨降。多年平均降水量为 220 mm。土壤为淡栗钙土。草地类型为短花针茅(*Stipa breviflora*) + 冷蒿(*Artemisia frigida*) + 无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*) 荒漠草原。该地区植被稀疏, 植物种类组成比较简单, 草层盖度较低。

1.2 试验设计

放牧试验区建于 2004 年, 在地形和植被条件一致的地带采用随机区组的方法设置放牧区域, 分为 3 个区组, 每个区组包含 4 个不同的载畜率, 即对照区(No grazing, CK, $0 \text{ 羊 hm}^{-2} (1/2\text{a})^{-1}$)、轻度放牧区(Light grazing, LG, $0.93 \text{ 羊 hm}^{-2} (1/2\text{a})^{-1}$)、中度放牧区(Moderate grazing, MG, $1.82 \text{ 羊 hm}^{-2} (1/2\text{a})^{-1}$) 和重度放牧区(Heavy grazing, HG, $2.71 \text{ 羊 hm}^{-2} (1/2\text{a})^{-1}$), 每个放牧小区的面积为 4.4 hm^2 (图 1)。放牧绵羊品种为蒙古羊。放牧时间为每年 6 月初至 10 月末的 6 时到 18 时^[17]。

CK1	LG1	HG1	MG1	HG2	CK2	MG2	LG2	LG3	CK3	MG3	HG3
区组I				区组II				区组III			

图 1 放牧地试验设计

Fig.1 Grazing experimental design

CK: 对照 No grazing; LG: 轻度放牧 Light grazing; MG: 中度放牧 Moderate grazing; HG: 重度放牧 Heavy grazing

1.3 研究方法

2021—2022 年 8 月份, 在每个不同载畜率处理样地内, 随机选择大小一致的冷蒿、木地肤、小叶锦鸡儿和驼绒藜(HG 区的驼绒藜密度值为零, 剔除该区域)各三株, 对所在的样方进行描述, 即测定样方内植物的密度(簇/ m^2)、高度(cm)和盖度(%), 将该植物齐地面刈割分种装入信封, 带回实验室放置于 65°C 烘箱烘至恒重并称重, 测定地上生物量^[18]。并在各个植株旁选取每个植株的非根际区域的土壤, 用内径 2 cm 土钻钻取 0—30 cm 的表层土壤进行取样。将所采取的土样带回实验室阴干, 从中挑出石砾和植物根系, 过 1 mm 土壤筛, 用于测定土壤有机碳(SOC)、全氮(AN)和速效磷(AP)。运用有机元素分析仪(Vario MACRO CUBE, Germany)测定土壤全氮, 采用重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机碳, 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定土壤速效磷^[19]。

为了分析灌木及其邻近土壤养分的变化, 使用 SAS 9.4 软件对植物数量特征值和土壤养分含量进行单因素方差分析, 方差分析调用 GLM 过程, 采用 Sigmaplot 14.0 软件对折线图和多重比较结果进行图形绘制, 并计算其变异系数值。为了探讨不同载畜率和深度下土壤养分的变化规律, 使用 Sufer 12.0 软件进行了热图分析。为了比较灌木与土壤之间的相关关系, 使用 Origin 2021 软件绘制了相关关系图, 并使用 Canoco 5 软件进行冗余分析。冗余分析可借助图形观察对应关系, 进一步分析在不同载畜率下的差异性 or 相似性^[20]。

2 结果与分析

2.1 灌木的数量特征值对载畜率的响应

冷蒿数量特征值均随着载畜率增加而降低(图 2)。冷蒿的密度在 CK 与 MG、HG 区均存在显著性差异($P < 0.05$), 且变异系数随着载畜率的增加而降低。冷蒿的高度在各个处理区之间均存在显著性差异($P < 0.05$), 且变异系数在 LG 区最低, MG 区最高。冷蒿的盖度和地上生物量在不同处理区(除 MG 与 HG 区)之间存在显著性差异($P < 0.05$), 且变异系数在 CK 区最低。

木地肤数量特征值对载畜率的响应各有特点(图 3)。木地肤的密度在各个处理区之间均不存在显著性

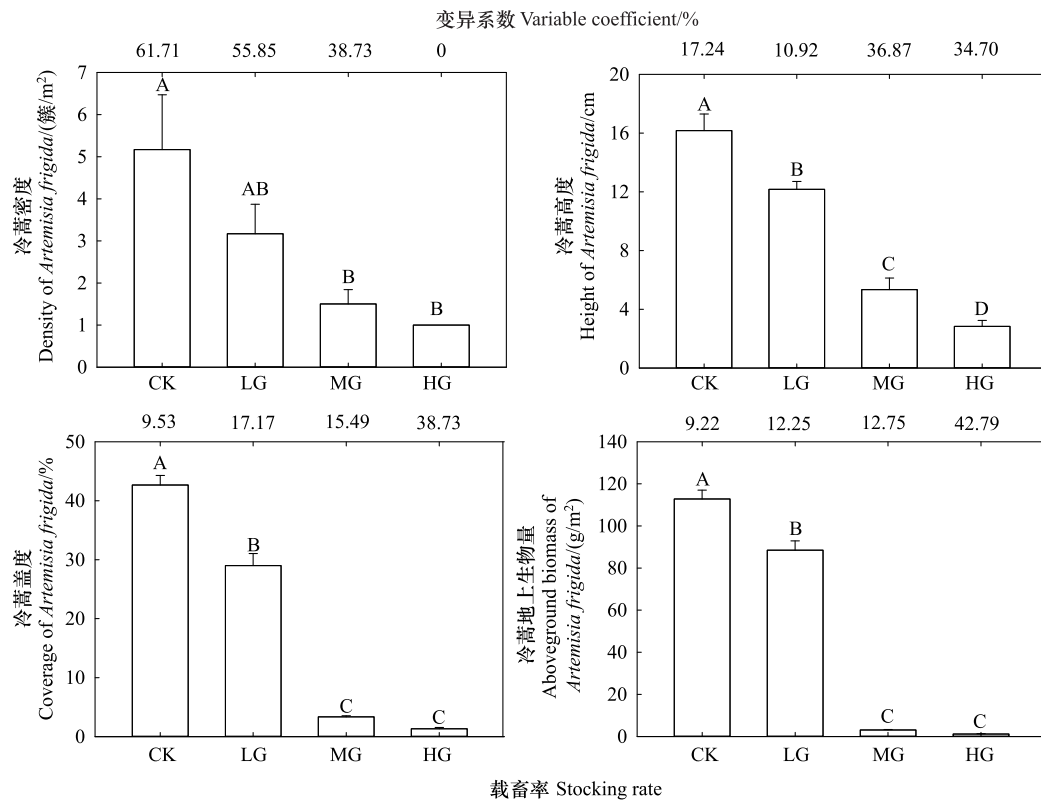


图2 冷蒿的数量特征值在不同载畜率下的方差分析图

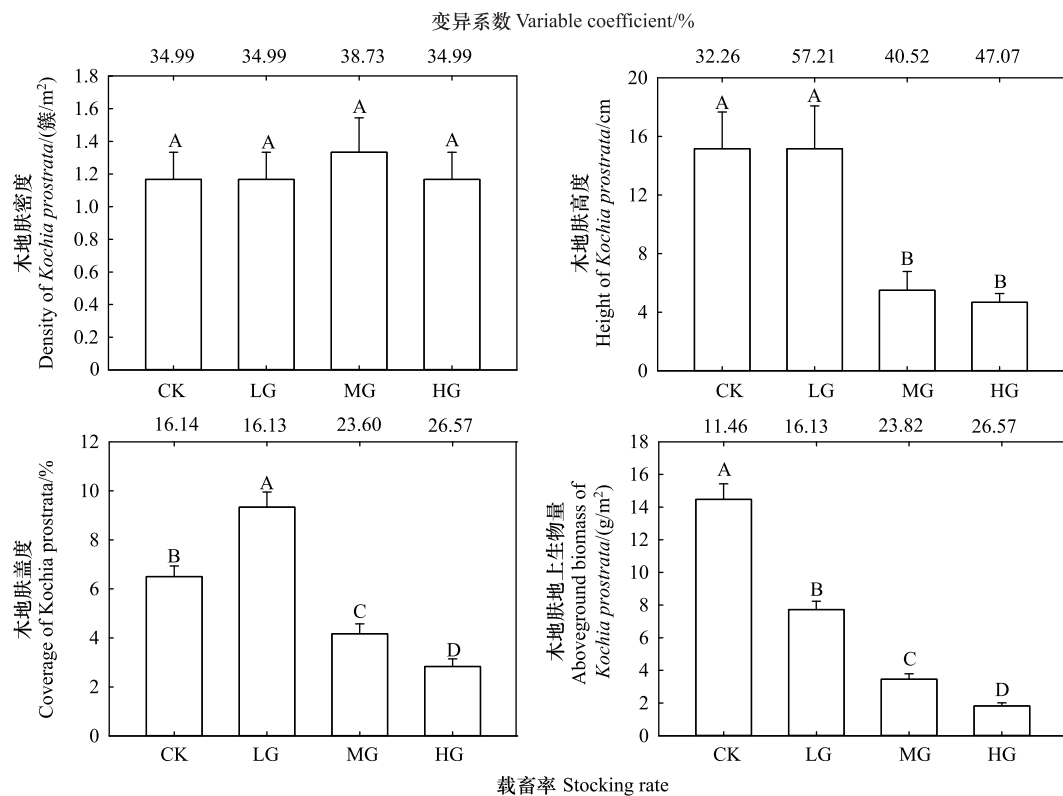
Fig.2 Variance analysis diagram of quantitative characteristic value of *Artemisia frigida* under different stocking rates

图3 木地肤的数量特征值在不同载畜率下的变化

Fig.3 Variance analysis diagram of quantitative characteristic value of *Kochia prostrata* under different stocking rates

差异,且变异系数在 MG 区最高。木地肤的高度在不同处理区下(除 CK 和 LG、MG 和 HG 区)均存在显著性差异($P<0.05$),且变异系数在 LG 区最高。木地肤的盖度和地上生物量在各个处理区存在显著性差异($P<0.05$),且其盖度的变异系数在 LG 区最低,其地上生物量的变异系数在 CK 区最低。

小叶锦鸡儿的密度和盖度均在 LG 区的值较高,其高度和地上生物量随着载畜率的增加而下降(图 4)。小叶锦鸡儿的密度在各个处理区之间均不存在显著性差异,且变异系数在 MG 区最低。小叶锦鸡儿的高度在各个处理区(除 MG 与 LG、HG 区)之间存在显著性差异($P<0.05$),且变异系数在 HG 区最低。小叶的锦鸡儿盖度在各个处理区(除 CK 与 LG 区)之间存在显著性差异($P<0.05$),且变异系数在 LG 区最低。小叶锦鸡儿的地上生物量在各个处理区(除 MG 与 HG 区)之间存在显著性差异($P<0.05$),且变异系数在 LG 区最低。

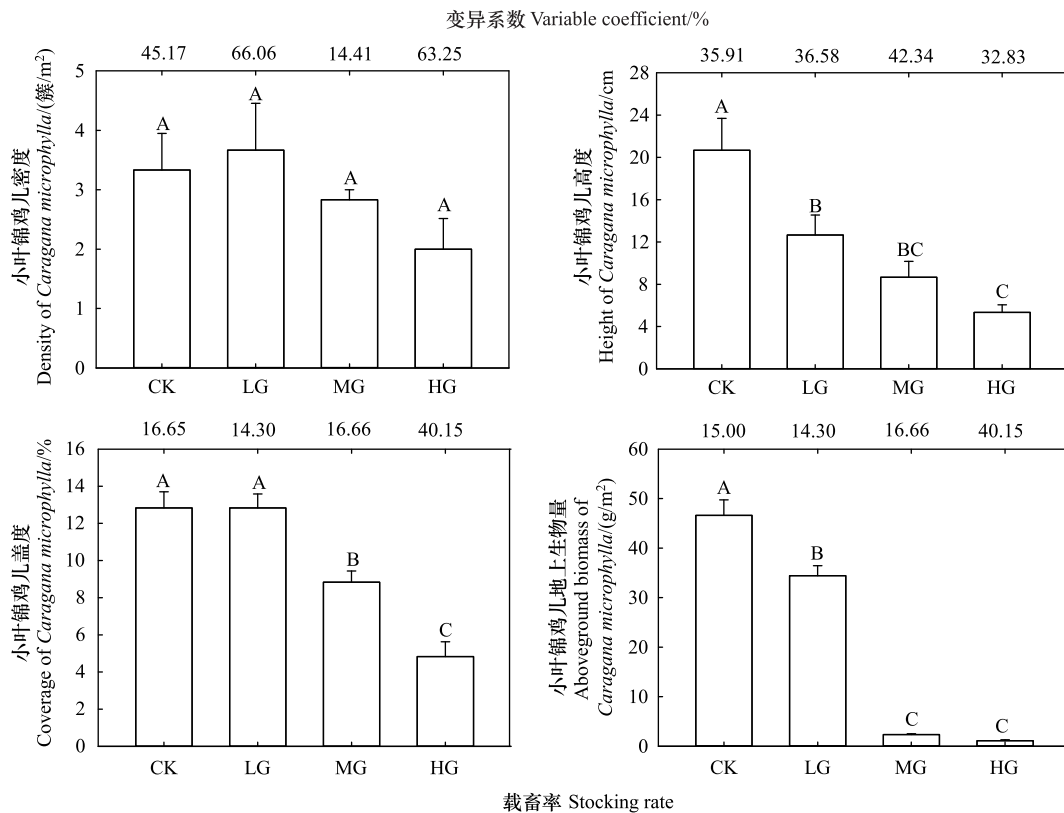


图 4 小叶锦鸡儿的数量特征值在不同载畜率下的变化

Fig.4 Variance analysis diagram of quantitative characteristic value of *Caragana microphylla* under different stocking rates

随着载畜率的增加,驼绒藜的高度和地上生物量呈下降趋势,其盖度在 LG 区具有最大值,其密度在各个处理区之间差异较小(图 5)。驼绒藜的密度在各个处理区之间均不存在显著性差异,且变异系数在 MG 区最高。驼绒藜的高度在 CK、LG 与 MG 区均存在显著性差异($P<0.05$),且变异系数在 CK 区最低。驼绒藜的盖度和地上生物量在各个处理区均存在显著性差异($P<0.05$),其盖度的变异系数在 CK 区最低,其地上生物量的变异系数在 MG 区最低。

2.2 灌木邻近土壤养分含量对载畜率的响应

对灌木邻近土壤全氮含量进行单因素方差分析发现,不同灌木邻近土壤全氮含量随着载畜率和土壤深度的增加而下降(图 6)。结合热图深入分析,冷蒿邻近土壤全氮含量在深度为 0—10 cm 时, LG 和 HG 区的含量略高,其他土壤深度下,全氮含量随着载畜率的增加而降低。木地肤邻近土壤全氮含量在 0—10 cm、10—20 cm 下均是 CK 和 HG 区的含量略高, MG 区的含量略低,土壤深度为 20—30 cm 时,全氮含量随着载畜率的增加而降低。小叶锦鸡儿邻近土壤全氮含量与载畜率和土壤深度呈负相关,且在 CK 区 10—20 cm 下全氮含

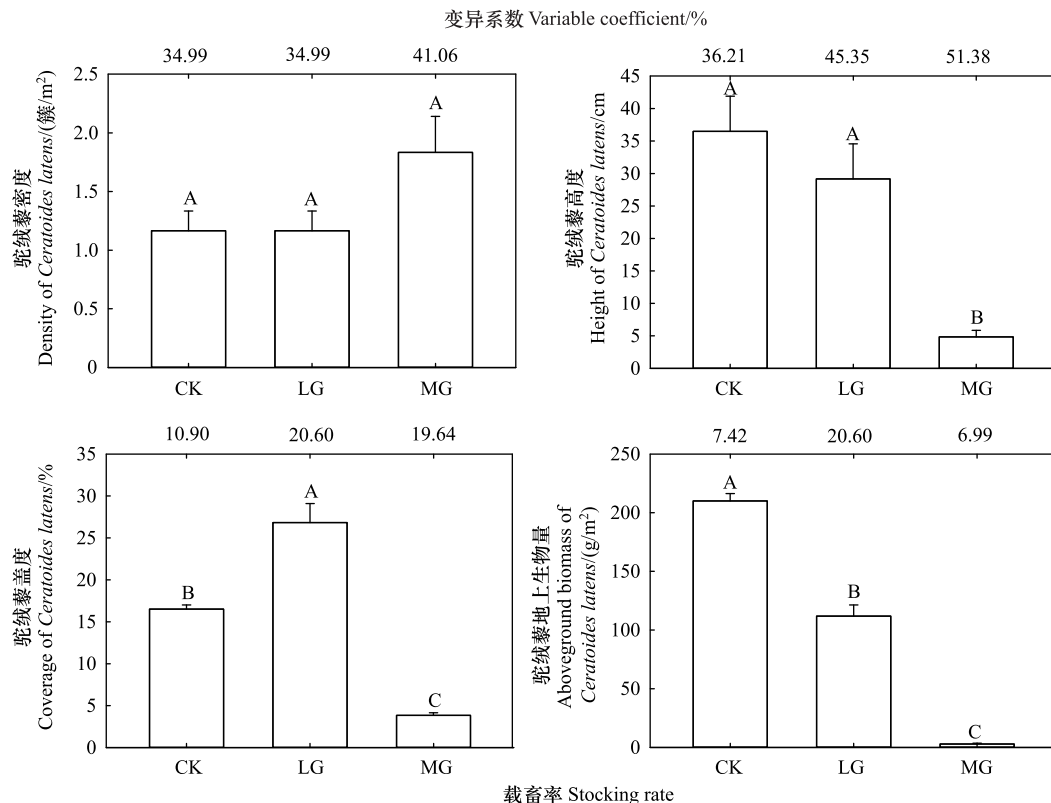


图5 驼绒藜的数量特征值在不同载畜率下的变化

Fig.5 Variance analysis diagram of quantitative characteristic value of *Ceratoides latens* under different stocking rates

量最高。在不同深度下,驼绒藜邻近土壤全氮含量均在 CK 区的值最高。

冷蒿邻近土壤有机碳含量随着载畜率和土壤深度的增加而下降,从 CK 到 LG 区的下降幅度最大, LG 到 HG 区下降幅度较为平缓。木地肤、小叶锦鸡儿和驼绒藜邻近土壤有机碳含量随着土壤深度的增加而降低。随着载畜率增加,木地肤和驼绒藜邻近土壤有机碳含量均在 LG 区存在最大值。小叶锦鸡儿邻近土壤有机碳含量在土壤深度为 0—10 cm、10—20 cm 时表现出一样的下降规律,在 LG 到 HG 区下降幅度较大,土壤深度为 20—30 cm 时,随着载畜率增加,有机碳含量下降幅度较为平缓(图 7)。

0—10 cm、10—20 cm 深度下,冷蒿邻近速效磷含量在 LG 区的值最高,20—30 cm 深度下,在 MG 区的值最高。随着载畜率增加,木地肤和驼绒藜邻近速效磷含量在 LG 区存在最大值小叶锦鸡儿邻近速效磷含量均在 HG 区出现最大值,且随着土壤深度的增加而降低(图 8)。

2.3 灌木的数量特征值与土壤养分含量的相关关系

对载畜率、灌木数量特征值与土壤养分进行相关分析,与冷蒿的关系中,载畜率与冷蒿高度、盖度和地上生物量均呈现出极显著负相关,载畜率与土壤全氮、有机碳呈负相关,土壤有机碳与冷蒿高度、盖度、地上生物量呈正相关。与木地肤的关系中,载畜率与木地肤高度、盖度、地上生物量均呈现出极显著负相关,土壤速效磷与木地肤高度、地上生物量呈显著负相关。与小叶锦鸡儿的关系中,载畜率与小叶锦鸡儿高度、盖度、地上生物量均呈极显著负相关。与驼绒藜的关系中,载畜率与驼绒藜高度、盖度、地上生物量和全氮均呈现出极显著负相关,载畜率与有机碳呈负相关,载畜率与速效磷呈正相关,土壤有机碳和全氮与驼绒藜高度、盖度、地上生物量呈正相关。由此可见,土壤有机碳与冷蒿和驼绒藜的高度、盖度、地上生物量呈正相关,土壤速效磷与木地肤高度、地上生物量呈显著负相关,小叶锦鸡儿的数量特征值与土壤养分的相关性较弱(图 9)。

为了探究不同载畜率下灌木数量特征值与土壤养分的交互关系,本文以不同灌木数量特征为响应变量,

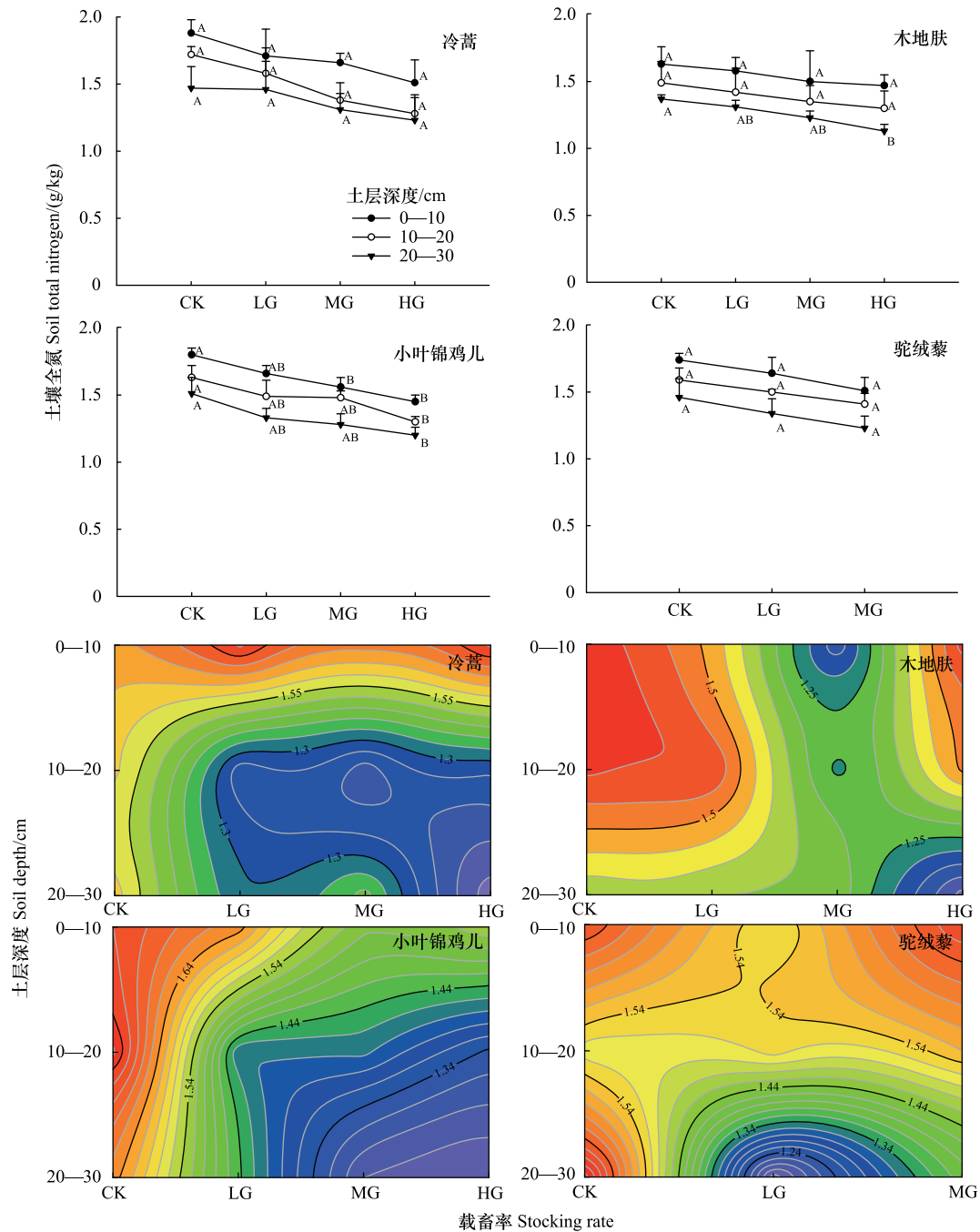


图6 不同载畜率下灌木邻近土壤全氮含量的变化

Fig.6 Changes of soil total nitrogen content near shrubs under different stocking rates

土壤养分了解释变量进行 RDA 分析,不同载畜率下灌木数量特征值与土壤养分的交互关系因灌木种群的不同而存在差异(图 10)。从冷蒿的分析结果可看出,前两个排序轴共解释了 50.6%的变异,冷蒿高度、盖度和地上生物量与 CK 区的相关性较强,土壤有机碳与 HG 区、全氮与 CK 区、速效磷与 MG 区有较强的相关性。从木地肤的分析结果可看出,前两个排序轴累计影响因子超过 56.2%,木地肤高度、地上生物量与 CK 区,速效磷与 LG 区之间有较强的相关性。从小叶锦鸡儿的分析结果可看出,速效磷与 LG 区、有机碳与 CK 区有较强的相关性。从驼绒藜的分析结果可看出,前两个排序轴累计影响因子超过 71.8%,土壤速效磷与 LG、MG 区,土壤有机碳与 CK、LG 区之间有较强的相关性。

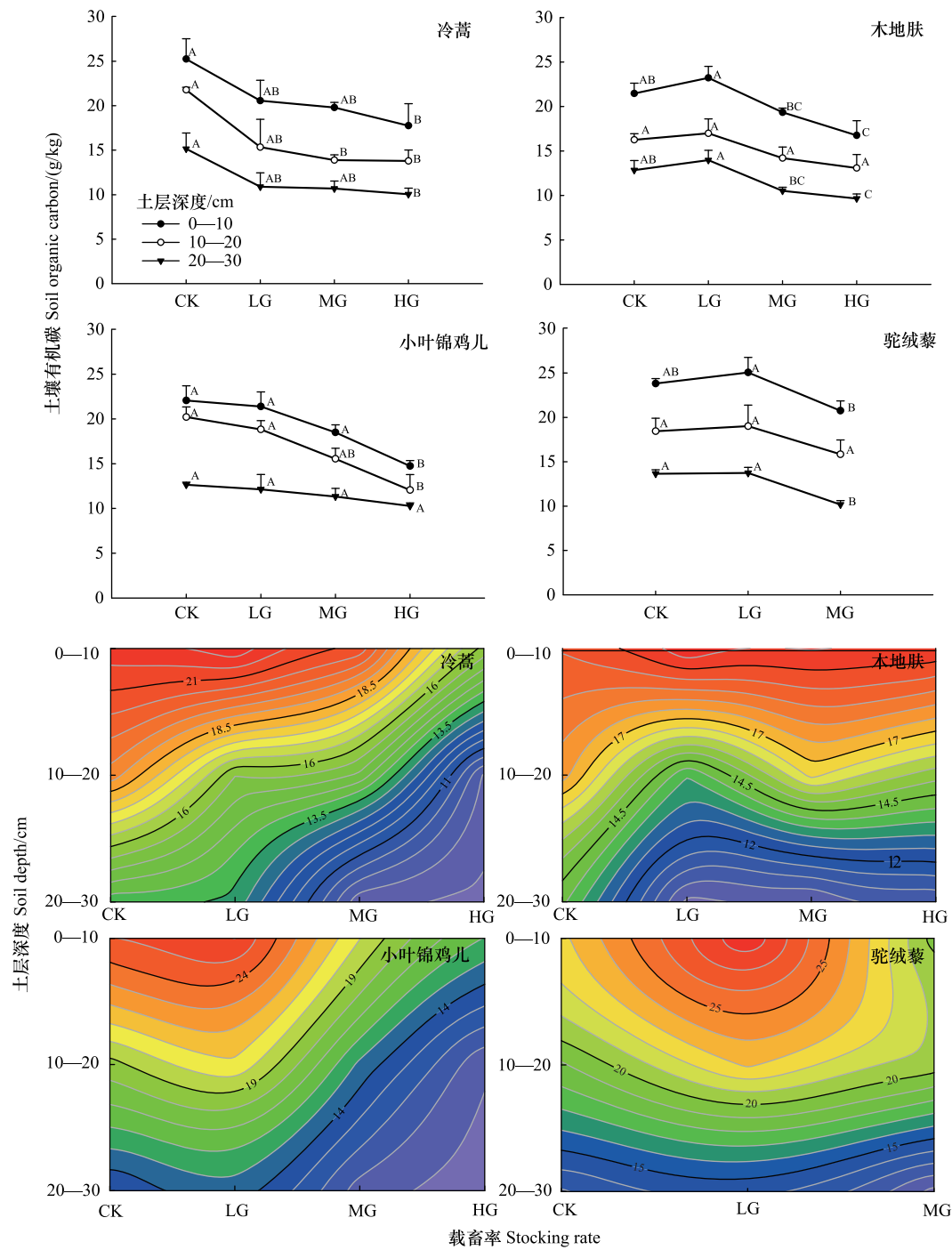


图7 不同载畜率下灌木邻近土壤有机碳含量的变化

Fig.7 Changes of soil organic carbon content near shrubs under different stocking rates

3 讨论

3.1 灌木的数量特征值对载畜率的响应

长时间或者高强度放牧均被认为是荒漠草原退化的重要原因^[21],植物种群在此期间为了适应放牧胁迫会产生植株小型化等适应策略^[22],这是各植物种群提高防御能力和种间相互作用而产生的结果^[23]。

汪诗平等研究指出冷蒿适应于高强度放牧的主要原因是冷蒿用不定根进行营养繁殖或分蘖。冷蒿具有

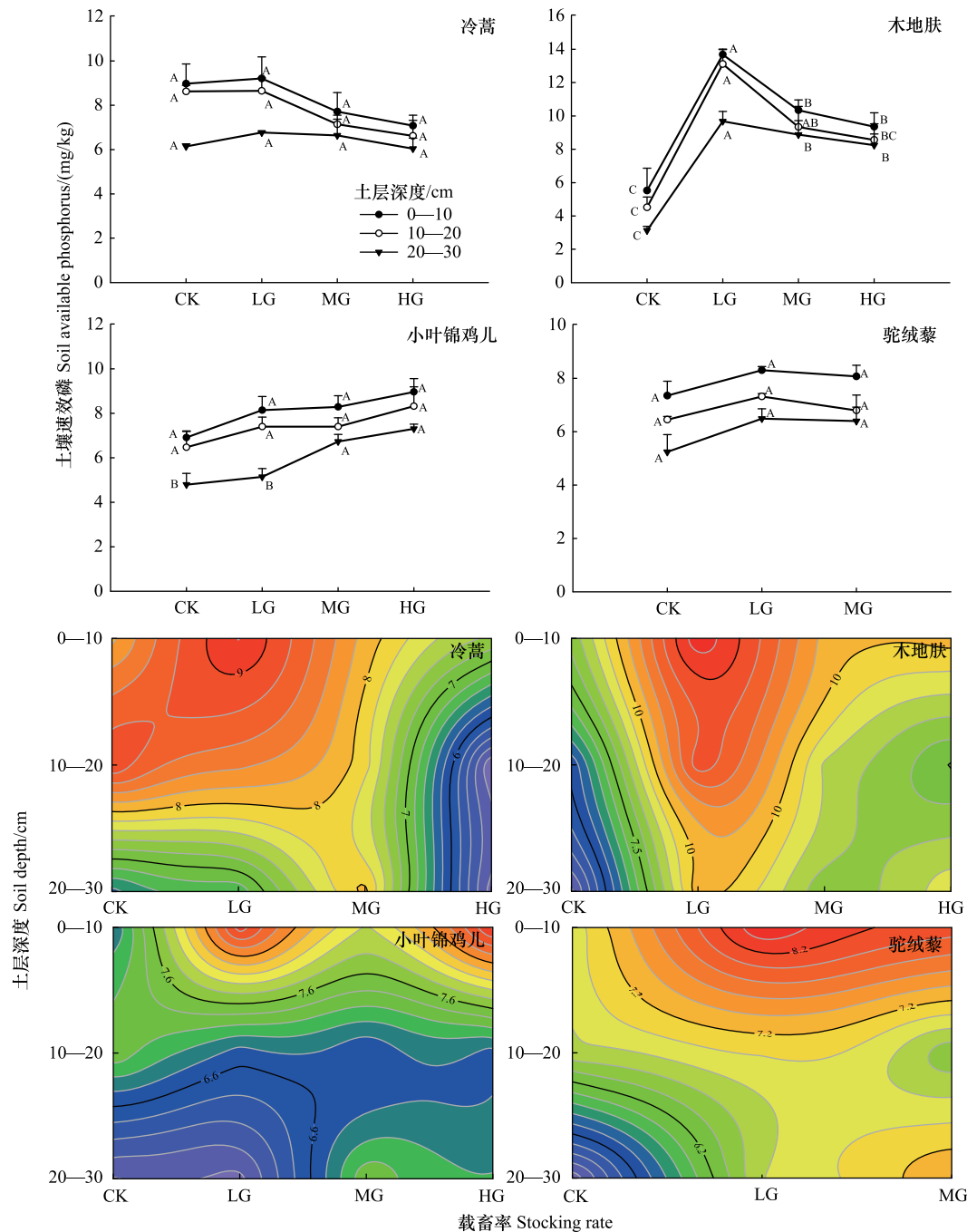


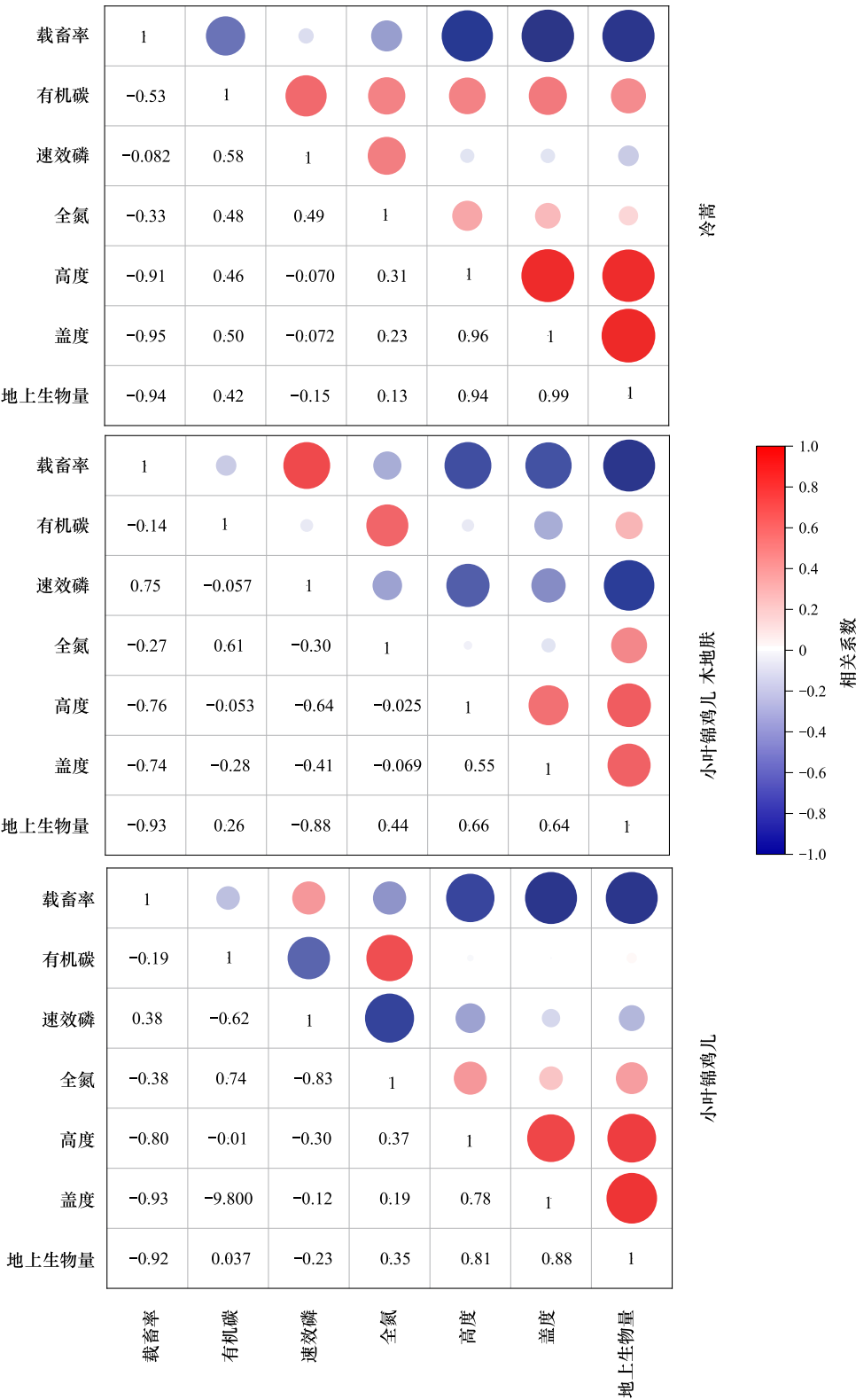
图8 不同载畜率下灌木邻近土壤速效磷含量的变化

Fig.8 Changes of soil available phosphorus content near shrubs under different stocking rates

直立或匍匐的生长形态的匍匐茎不仅可以进行营养生长,还能繁殖地上营养枝和地下不定根^[24]。匍匐茎的增加可以获取更多营养资源,使得冷蒿适应外界环境的变化,在一定程度上可以抵抗放牧强度的干扰^[25]。本研究中,冷蒿数量特征值随着载畜率增大呈下降趋势,其原因可能是建群种短花针茅在资源竞争中占优势^[26],尤其在生境破碎严重的情况下,冷蒿的繁殖方式转变为单一的营养繁殖,最终导致冷蒿种群密度降低,无法进行扩张^[27]。本研究中,高载畜率均会使得小叶锦鸡儿、木地肤和驼绒藜的数量特征值下降。这是由于小叶锦鸡儿虽然是具有超补偿能力的萌蘖植物,植物根系会储存大量的碳水化合物和营养物质,地上组织受到干扰或破坏后,强大的根系将储存的营养运输到地上,供应地上部分的生长^[28],但随着家畜采食的频率增

加,小叶锦鸡儿的地上组织受到破坏后,补偿能力受损^[29-31]。在干旱条件下,木地肤和驼绒藜能充分利用环境资源并保持生命活动所需的能量^[32-33]。虽然木地肤和驼绒藜可以忍耐干旱环境,但由于放牧家畜的干扰,也会出现植株变矮的现象。

重度放牧会使植物在繁殖中产生消极影响,放牧抑制了荒漠草原灌木的繁殖与更新。只有在适度放牧条件下,荒漠草原灌木才可以确保牧草的可持续性,使可持续放牧系统的发展成为可能。



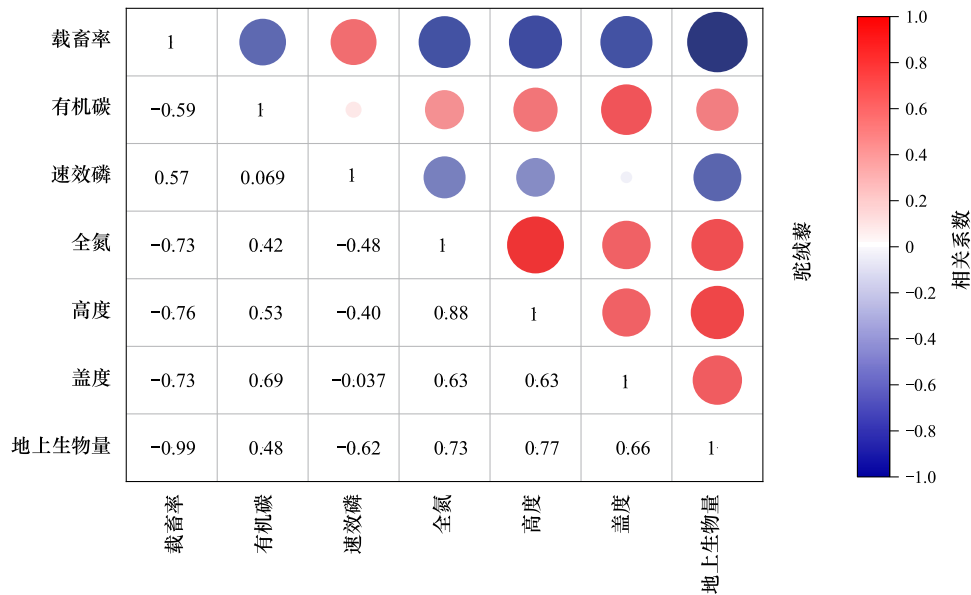


图9 载畜率、灌木数量特征值与土壤养分的相关关系

Fig.9 Correlation between stocking rate, quantitative characteristic value of shrubs and soil nutrients

3.2 土壤养分对载畜率的响应

过度放牧会改变表层土壤稳定性,同时使土壤养分含量发生变化^[34—35]。本研究中不同灌木邻近土壤养分含量均在0—10 cm 的值最高,其原因可能是表层土壤受家畜排泄粪尿的影响更强烈,增加了凋落物含量和土壤微生物活性,大多数养分输入到表层土壤^[36—37]。

土壤有机碳是衡量土壤碳汇能力的重要指标,宿婷婷等人发现典型草原上有机碳含量变化整体呈先上升后下降的趋势^[38]。李强等人发现,退化盐碱草地上土壤碳氮含量在放牧条件下表现为先增加后降低趋势^[39],均与本研究的结果一致,说明一定程度放牧有利于土壤碳氮元素的回归积累,改善土壤肥力结构,符合“中度干扰假说”^[40]。轻度放牧条件下,地表水热状况良好,显著提高了草地的净处理生产力,且家畜对土壤的适当刺激和家畜粪便的堆积,会增加土壤的养分含量^[41—42]。但高强度放牧会降低土壤碳氮含量,主要是因为家畜不间断地踩踏土壤表面,会降低植物种群的地上生物量,加快土壤呼吸作用,减弱土壤碳氮养分的循环和积累,降低土壤的固碳能力^[43]。磷含量主要受非生物因素控制^[44],蔡育蓉的研究认为过度放牧条件下,地表植被受到啃食后生物量显著降低,导致磷含量的净输出增大,加上放牧样地风蚀程度较强,家畜粪便的输入较少^[45]。本研究中不同的植物种群邻近土壤速效磷含量呈现出的规律不一致,这可能由于土壤养分含量对放牧强度具有一定的“滞后”性^[46]。

放牧对土壤的影响受到植物种群自身特征和土壤养分等多方面因素的影响,在本研究中由于荒漠草原灌木株丛较小,灌木分布和粪尿的随机性,也是导致土壤养分含量在不同载畜率下变化的原因。

3.3 灌木的数量特征与土壤养分的关系

植物和土壤之间可以进行物质交换,土壤质量的好坏直接影响到植物的生长需要。植物与土壤之间的相互关系取决于多种因素,学者们在不同区域的研究结果不一致。韦应莉认为地上生物量与土壤全氮呈正相关关系^[47]。在内蒙古典型草原上,张娜等人对植物和土壤相关性进行研究,认为地下生物量和群落总盖度与土壤碳氮磷含量呈显著正相关^[48]。肖颖等研究认为植被盖度与土壤全磷显著正相关,磷添加显著增加植物群落盖度,改善了土壤理化状态^[49]。黄雅茹等表明植物丰富度指数、均匀度指数及多样性指数与全氮、速效磷和有机碳呈正相关关系^[50]。本研究中,不同植物种群的指标与土壤养分的相关关系的结果均不一致,冷蒿和驼绒藜的高度、盖度、地上生物量与有机碳呈正相关,木地肤的高度、地上生物量与速效磷呈显著负相关,这与

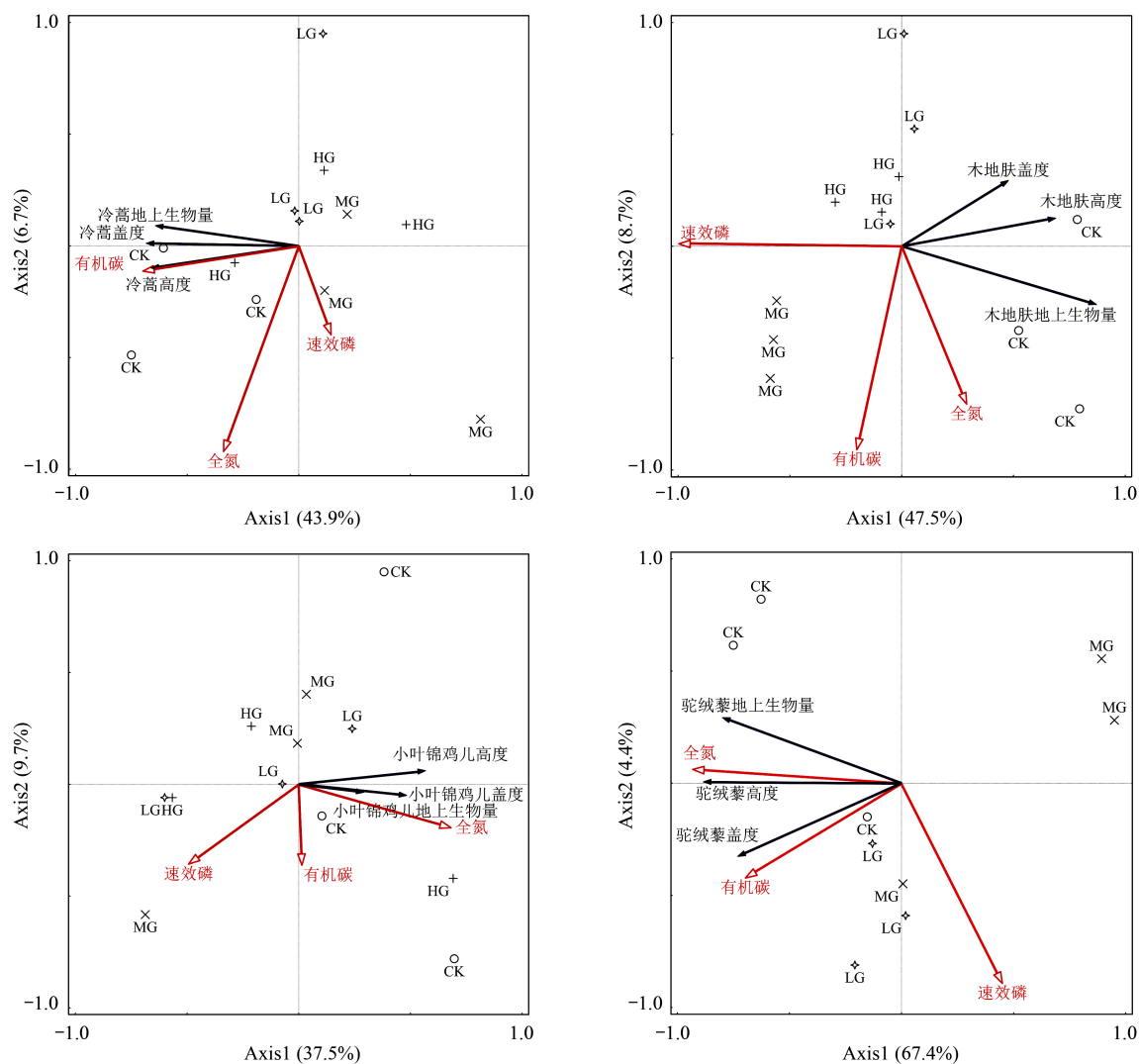


图 10 不同载畜率下灌木数量特征值与土壤养分的冗余分析

Fig.10 Redundancy analysis of quantitative characteristic value of shrubs and soil nutrients under different stocking rates

植物群落种类、海拔高度、水热条件等有关^[51]。

在荒漠草原生态系统中,植物为了正常进行生命活动,高效运用较少的养分来适应恶劣环境,这种情况在放牧干扰下表现更为明显^[52]。适度放牧通过增加光合效率和加速养分循环等方式来促进草原优势物种补偿生长,增加植物群落稳定性,改善土壤理化性状^[53]。本文仅对研究区内土壤的全氮、有机碳、速效磷与植物指标进行了分析,更多的土壤因子与植物种群之间的相关关系有待于进一步的研究。

4 结论

研究结果表明,高载畜率(MG、HG区)会使荒漠草原灌木及半灌木的数量特征值出现不同程度地下降,甚至使驼绒藜在HG区消失。不放牧(CK区)或者轻度放牧(LG区)会增加土壤养分含量,且该值会随着土壤深度的增加而逐渐降低。为进一步了解灌木种群在荒漠草原的分布机理,今后还需继续长期进行野外观测试验,深入探讨影响灌木种群相关生理指标,为荒漠草原的可持续管理提供理论支撑。

参考文献(References):

- [1] Zheng Y R, Zhou G S, Zhuang Q L, Shimizu H. Long-term elimination of grazing reverses the effects of shrub encroachment on soil and vegetation

- on the Ordos Plateau. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(5): e2019JG005439.
- [2] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 草地生态系统服务功能分析及其评价指标体系. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 155-160.
- [3] Saintilan N, Rogers K. Woody plant encroachment of grasslands: a comparison of terrestrial and wetland settings. *New Phytologist*, 2015, 205(3): 1062-1070.
- [4] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 崔建恒. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤性状特征. *中国沙漠*, 2002, 22(4): 333-338.
- [5] Bauters M, Drake T W, Verbeeck H, Bodé S, Hervé-Fernández P, Zito P, Podgorski D C, Boyemba F, Makelele I, Cizungu Ntaboba L, Spencer R G M, Boeckx P. High fire-derived nitrogen deposition on central African forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(3): 549-554.
- [6] Throop H L, Reichmann L G, Sala O E, Archer S R. Response of dominant grass and shrub species to water manipulation: an ecophysiological basis for shrub invasion in a Chihuahuan Desert Grassland. *Oecologia*, 2012, 169(2): 373-383.
- [7] 古琛, 杜宇凡, 乌力吉, 陈万杰, 薛文杰, 赵萌莉. 载畜率对荒漠草原群落及植物功能群生物量的影响. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 1962-1968.
- [8] 王占文. 荒漠草原不同载畜率下主要灌木种群对近邻草本植物的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [9] 余海龙, 樊瑾, 牛玉斌, 朱湾湾, 黄菊莹. 灌丛树干茎流与根区优先流对灌丛沙堆“土壤沃岛效应”的影响研究. *草地学报*, 2019, 27(1): 1-7.
- [10] 瞿王龙, 杨小鹏, 张存涛, 魏冰. 干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展. *草业学报*, 2015, 24(4): 201-207.
- [11] Van der Putten W H, Bardgett R D, Bever J D, Bezemer T M, Casper B B, Fukami T, Kardol P, Klironomos J N, Kulmatiski A, Schweitzer J A, Suding K N, Van de Voorde T F J, Wardle D A. Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges. *Journal of Ecology*, 2013, 101(2): 265-276.
- [12] 刘忠宽, 智健飞, 刘振宇. 内蒙古草原不同植物种群土壤化学元素特征. *华北农学报*, 2005, 20(6): 97-102.
- [13] 孙世贤, 崔志明, 陈立波, 贾丽娟, 卫智军. 放牧强度季节调控对荒漠草原主要植物种群和土壤碳、氮的影响. *中国草地学报*, 2014, 36(2): 49-54.
- [14] 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.
- [15] 侯东杰, 韩蓓蕾, 阿格尔, 韩胜男, 王忠武. 围封对不同退化程度荒漠草原植物群落和土壤的影响. *生态学报*, 2023, 43(17): 7226-7236.
- [16] 张博涵, 吕世杰, 屈志强, 倪芳芳, 李治国. 不同载畜率下荒漠草原生长季地表特征及对风沙通量的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(4): 33-41.
- [17] Ding H J. Effect of different stocking rate on plant community characteristics in *Stipa breviflora* desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36: 55-60.
- [18] Sun J, Liu M, Fu B J, Kemp D, Zhao W W, Liu G H, Han G D, Wilkes A, Lu X Y, Chen Y C, Cheng G W, Zhou T C, Hou G, Zhan T Y, Peng F, Shang H, Xu M, Shi P L, He Y T, Li M, Liu S L. Reconsidering the efficiency of grazing exclusion using fences on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1405-1414.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 杜红春, 朱挺兵, 龚进玲, 胡飞飞, 朱永久, 杨德国. 澜沧江西藏段浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系. *生态学杂志*, 2022, 41(9): 1769-1777.
- [21] Bai Y F, W 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.
- [22] 王晓芳, 马红彬, 刘杰, 苗海涛, 沈艳, 周瑶, 马静利. 放牧对草原植物功能性状影响研究进展. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 569-576.
- [23] 张鲜花, 陈爱萍, 朱进忠, 李海琪. 天山北坡不同区域及海拔对天然草地鸭茅群落物种间关系影响. *草业学报*, 2017, 26(8): 12-23.
- [24] 张敏, 张晓明, 宛涛, 蔡萍, 李红, 伊卫东, 宛诣超, 葛云辉. 冷蒿抗氧化防御系统对不同放牧强度的响应研究. *草原与草业*, 2022, 34(2): 20-26.
- [25] Wang Q, Zhang H D, Yang Q, Wang T M, Zhang Z W, Liu J L, Shi M M, Ping X Y. The impact of grazing intensity on the allelopathic effect of *Artemisia frigida* in a temperate grassland in Northern China. *Flora*, 2022, 288: 152005.
- [26] Yong Z, Qiong G, Xu L, Yu M, Tian Y Q. Shrubs proliferated within a six-year enclosure in a temperate grassland- Spatiotemporal relationships between vegetation and soil variables. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2014, 6(2): 0139-0149.
- [27] 马瑞君, 王明理, 朱学泰, 鲁先文, 孙坤. 黄芩甙挥发物的化感作用及其主要成分分析. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1826-1829.
- [28] 熊小刚, 韩兴国, 白永飞, 潘庆民. 锡林河流域草原小叶锦鸡儿分布增加的趋势、原因和结局. *草业学报*, 2003, 12(3): 57-62.
- [29] 王立红, 王悦, 王德凯, 解李娜, 马成仓. 放牧对小叶锦鸡儿种群数量特征的影响. *草业科学*, 2018, 35(4): 800-806.
- [30] Xie L N, Guan L J, Guo H Y, Chen W Z, Liu Z, Li Q F, Ma C C. Reproductive effort of *Caragana microphylla* under long-term grazing exclusion

- in a semi-arid grassland. *Grassland Science*, 2021, 67(4): 328-336.
- [31] Dong K, Xu Y J, Hao G, Yang N, Zhao N X, Gao Y B. Both vacant niches and competition-trait hierarchy are useful for explaining the invasion of *Caragana microphylla* into the semi-arid grassland. *Plant and Soil*, 2020, 448(1): 253-263.
- [32] Shamsutdinov N. Ecological and biological characteristics and productivity of *Kochia prostrata* in the conditions of the Caspian semi-desert. *BIO Web of Conferences*, 2022, 43: 02025.
- [33] Seidl A, Tremetsberger K, Pfanfelt S, Blattner F R, Neuffer B, Friesen N, Hurka H, Shmakov A, Batlai O, Žerdoner Čalasan A, Vesselova P V, Bernhardt K G. The phylogeographic history of *Krascheninnikovia* reflects the development of dry steppes and semi-deserts in Eurasia. *Scientific Reports*, 2021, 11: 6645.
- [34] 任瑾涛, 张璞进, 吴英, 朱蔚娜, 金正亮, 张艳丽, 宝文智, 清华. 不同放牧退化阶段大针茅草原土壤有机碳稳定性及其来源研究. *中国草地学报*, 2021, 43(7): 37-44.
- [35] 杜凯, 康宇坤, 张德罡, 苏军虎. 不同放牧方式对祁连山高寒草甸有机碳、氮库的影响. *草地学报*, 2020, 28(5): 1412-1420.
- [36] Stark S, Kytöviita M M. Simulated grazer effects on microbial respiration in a subarctic meadow: implications for nutrient competition between plants and soil microorganisms. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(1/2): 20-31.
- [37] Chen T, Christensen M, Nan Z B, Hou F J. The effects of different intensities of long-term grazing on the direction and strength of plant-soil feedback in a semiarid grassland of Northwest China. *Plant and Soil*, 2017, 413(1): 303-317.
- [38] 宿婷婷, 马红彬, 周瑶, 贾希洋, 张蕊, 张双乔, 胡艳莉. 黄土丘陵典型草原土壤理化性质对生态恢复措施的响应. *草业学报*, 2019, 28(4): 34-46.
- [39] 李强, 宋彦涛, 周道玮, 王敏玲, 陈笑莹. 围封和放牧对退化盐碱草地土壤碳、氮、磷储量的影响. *草业科学*, 2014, 31(10): 1811-1819.
- [40] 王晓光, 乌云娜, 霍光伟, 宋彦涛, 张凤杰. 放牧对呼伦贝尔典型草原植物生物量分配及土壤养分含量的影响. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 1230-1236.
- [41] 丁海君, 韩国栋, 王忠武, 赵和平, 张睿洋, 张新杰. 短花针茅荒漠草原不同载畜率对土壤的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(4): 524-531.
- [42] 杨浩, 白永飞, 李永宏, 韩兴国. 内蒙古典型草原物种组成和群落结构对长期放牧的响应. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 499-507.
- [43] 张亮, 沈潮, 邓杰, 田浩. 放牧干扰对草地土壤理化性质的影响. *防护林科技*, 2016(12): 1-4, 17.
- [44] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, Bowker M A, Wallenstein M D, Quero J L, Ochoa V, Gozalo B, García-Gómez M, Soliveres S, García-Palacios P, Berdugo M, Valencia E, Escobar C, Arredondo T, Barraza-Zepeda C, Bran D, Carreira J A, Chaieb M, Conceição A A, Derak M, Eldridge D J, Escudero A, Espinosa C I, Gaitán J, Gatica M G, Gómez-González S, Guzmán E, Gutiérrez J R, Florentino A, Hepper E, Hernández R M, Huber-Sannwald E, Jankju M, Liu J S, Mau R L, Miriti M, Moneris J, Naseri K, Noumi Z, Polo V, Prina A, Pucheta E, Ramírez E, Ramírez-Collantes D A, Romão R, Tighe M, Torres D, Torres-Díaz C, Ungar E D, Val J, Wamiti W, Wang D L, Zaady E. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. *Nature*, 2013, 502(7473): 672-676.
- [45] 蔡育蓉. 灌丛化草原土壤功能空间异质性及其对放牧的响应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [46] 孙宗玖, 朱进忠, 张鲜花, 郑伟, 靳瑰丽, 古伟容. 放牧强度对昭苏草甸草原土壤有机质及速效养分的影响. *草业科学*, 2013, 30(7): 987-993.
- [47] 韦应莉. 东祁连山灌丛草地土壤微生物量及群落结构对放牧和围封的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [48] 张娜. 不同放牧强度对典型草原植被群落特征及土壤理化性状的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [49] 肖颖. 川西北高寒草甸植物群落结构和土壤理化特性对氮、磷添加的响应[D]. 成都: 西南民族大学, 2022.
- [50] 黄雅茹, 辛智鸣, 葛根巴图, 李新乐, 罗凤敏, 徐军, 刘芳, 郝玉光, 姚斌. 乌兰布和沙漠东北缘典型灌木群落多样性与土壤养分相关性研究. *中国农业科技导报*, 2018, 20(9): 95-105.
- [51] 贾荣, 兰登明, 郭威星, 王玉婕, 温静. 宁夏东北部典型荒漠草原植物群落与土壤养分特征. *生态环境学报*, 2020, 29(3): 483-488.
- [52] 聂婷婷, 董乙强, 杨合龙, 阿斯太肯·居力海提, 周时杰, 安沙舟. 围栏封育对蒿类荒漠植物-土壤碳氮磷化学计量特征的影响. *中国农业科技导报*, 2023, 25(3): 178-187.
- [53] 李怡, 韩国栋. 放牧强度对内蒙古大针茅典型草原地下生物量及其垂直分布的影响. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2011, 32(2): 89-92.