

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.012

引用格式:汪蓉,吕世杰,张博涵,等.不同载畜率下荒漠草原植物群落氮磷内稳性研究[J].草地学报,2026,34(6):2090—2098
WANG Rong, LÜ Shi-jie, ZHANG Bo-han, et al. Research on the Nitrogen and Phosphorus Homeostasis of Plant Community of Desert Steppe under Different Stocking Rates[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2090—2098

不同载畜率下荒漠草原植物群落氮磷内稳性研究

汪蓉, 吕世杰, 张博涵, 屈志强, 李治国*

(内蒙古农业大学草业学院/草地资源教育部重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010011)

摘要:为研究不同载畜率下荒漠草原植物群落氮磷内稳性特征,本文以内蒙古荒漠草原为研究对象,采取完全随机区组设计,共设置4个载畜率水平,3次重复,分别为对照组(Control, CK)0、轻度(Light stocking rate, LG)0.19、中度(Moderate stocking rate, MG)1.82和重度(Heavy stocking rate, HG)2.71[羊单位·hm⁻²·(0.5a)⁻¹]。通过测定植物群落和土壤全氮(Total nitrogen, TN)、全磷(Total phosphorus, TP)含量,并计算内稳性指数(Homeostasis index, H),结果显示:放牧与土层的交互作用对土壤无显著影响。放牧降低了植物群落TN和TP含量及其内稳性,当载畜率<1.1或>3.65时,TN内稳性为弱稳态。TP内稳性在HG区有所增强,当载畜率<1.09或>2.78时TP为弱稳态。MG区N:P内稳性最强,当载畜率为0.17~1.9时N:P内稳性为弱稳态。总体来看,当载畜率为0.17~1.09,为轻中度放牧时,草地生态系统均具有一定的稳态调节能力。载畜率对H_{TN}和H_{TP}均存在一个最小阈值2.37和1.94;对H_{N:P}存在一个最大阈值1.03。

关键词:荒漠草原;植物群落;载畜率;生态化学计量;内稳性

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2090-09

Research on the Nitrogen and Phosphorus Homeostasis of Plant Community of Desert Steppe under Different Stocking Rates

WANG Rong, LÜ Shi-jie, ZHANG Bo-han, QU Zhi-qiang, LI Zhi-guo*

(College of Grass Industry, Inner Mongolia Agricultural University/Key Laboratory of Grassland Resources, Ministry of Education, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China)

Abstract: In order to study the nitrogen and phosphorus homeostasis of plant community of desert steppe under different stocking rates, the *Stipa breviflora* desert steppe in Inner Mongolia was used as the research object. The grazing experiment adopted a completely randomized block design, with a total of 4 levels of stocking rate and 3 repetitions, namely control (CK), light grazing (LG), moderate grazing (MG) and heavy grazing (HG) [sheep units·hm⁻²·0.5a⁻¹]. The total nitrogen (TN) and the total phosphorus (TP) in plant community and soil were measured, and then calculated the homeostasis index (H), the results showed that the interaction between grazing and soil layer had no significant effect on the soil. Grazing attenuated TN and TP homeostatic regulation of the plant community. When the stocking rate was <1.1 or > 3.65, TN homeostasis was weakly homeostatic. The TP homeostasis was enhanced in HG. When the stocking rate was <1.09 or > 2.78, TP homeostasis was weakly homeostatic. The N:P homeostasis was the strongest in MG, and when the stocking rate ranged from 0.17 to 1.9, the N:P homeostasis was weakly homeostatic. Overall, when the stocking rate ranged from 0.17 to 1.09, which is a light to moderate grazing level, the grassland ecosystem had homeostatic regulation. The stocking rate has a minimum threshold of 2.37 for H_{TN} and 1.94 for H_{TP}, while a maximum threshold of 1.03 exists for H_{N:P}.

Key words: Desert steppe; Plant community; Stocking rate; Ecological stoichiometry; Homeostasis

收稿日期:2025-10-14;修回日期:2026-01-03

基金项目:国家重点研发项目-基于生态和经济双赢的草地-家畜系统可持续管理研究(2024YFE0113100);内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目“荒漠草原综合治理与家庭牧场可持续管理集成技术示范”(2024JBGS0011);内蒙古自治区一流学科科研专项项目(YLXKZX-NND-029);国家自然科学基金项目(32060384)资助

作者简介:汪蓉(1999-),女,汉族,青海海东人,硕士研究生,主要从事草地资源与管理研究,E-mail:wr19490@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:nmndlgz@163.com

“生态化学计量学”是研究多种化学物质在生态相互作用和过程中的平衡关系的学科^[1]。“生态化学计量内稳性”即大多数生物体保持其体内化学成分恒定的能力,是生态化学计量学存在的理论基础^[2-3]。对于植物而言,内稳性可能与植物的养分和生长或竞争能力有关,其稳态程度可以反映植物的适应性和生态策略^[4]。高稳态物种的高优势度可以提高群落内稳性以应对环境变化,而低稳态物种的优势度增加可能威胁群落稳态^[5]。此外,稳态调节反映了生物体对周围环境作出反应时潜在的生理和生化分配,而群落水平的稳态与生态系统稳定性和功能呈正相关^[6-7]。因此,内稳性可成为支撑重要生态现象的预测机制^[8]。

碳(C)、氮(N)和磷(P)作为植物生长中最重要且在生态学中被广泛研究的三大元素,对维持生态系统中的元素平衡至关重要。植物通过根部吸收和释放氮和磷等元素来调节生态化学计量平衡^[9]。植物的氮磷比也可用于确定植物群落的营养限制状态^[10]。放牧作为内蒙古草原主要的利用方式,会使植物群落C、N、P总量发生明显的变化^[11]。

在荒漠草原,不同放牧强度下,植物群落会调整其养分分配部位来适应环境,从而保证群落稳态^[12]。然而,荒漠草原植物群落在不同放牧强度下的生态化学计量内稳态特征尚不明确。在此,本研究以内蒙古荒漠草原建立的长期绵羊载畜率梯度放牧的试验平台为基础,测量植物群落和土壤中的总氮含量、总磷含量及氮磷比,并计算总氮(TN)、总磷(TP)和氮磷比的内稳性指数(H)。为验证植物群落的TN、TP和N:P内稳性是否与土壤中的养分浓度相关,不同放牧强度下植物群落的稳态调节机制,以及在何种载畜率下达到稳态,为荒漠草原合理放牧强度的确定提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验研究地点位于乌兰察布市四子王旗中南部王府一队的内蒙古农牧业科学院综合试验示范中心(41°47'17"N, 111°53'46"E)。研究区属典型的大陆性干旱气候,多年平均降水量为311.4 mm,多集中在6—9月份,分布极不均匀;年平均风速4~6 m·s⁻¹,8级大风日数50~70天,沙暴日数15~20天。研究区草地类型为温性荒漠草原短

花针茅(*Stipa breviflora*) + 冷蒿(*Artemisia frigida*) + 无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)型。植被低矮稀疏,种类组成比较贫乏;土壤类型为淡栗钙土,土壤贫瘠,有机质含量低,含沙量大,土质疏松。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 本研究是以2004年建立的长期绵羊载畜率梯度放牧的试验平台为基础,样地总面积约50 hm²,采用完全随机区组设计,将12个围栏放牧小区(每个小区占地面积4.4 hm²)划分为3个区组,每个区组内随机排列4个不同的载畜率水平:对照(CK)、轻度放牧(LG)、中度放牧(MG)和重度放牧(HG)。在放牧季内(5月30日—10月31日)设定不同的载畜率值,分别为0(CK)、0.91(LG)、1.82(MG)和2.71(HG),放牧绵羊只数在轻度、中度和重度区分别为4只、8只和12只,每天早晨6:00将羊按编号(保证每个小区的羊固定不变,以减少试验误差)赶入试验小区,下午18:00再把羊赶回圈棚,在放牧期间没有家畜补饲。

2022年8月,在每个小区随机选取3个1 m×1 m的样方,将样方内的所有植物齐地面刈割、混匀后带回;用直径为5 cm的土钻对每个样方内0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm的土壤进行取样。

1.2.2 样品分析 将植物群落样品,除去泥土等杂质,在105℃下烘干15 min杀青,然后在65℃下烘干至恒重,充分研磨(过100目筛)后备用。将土壤在室内自然风干,进行研磨处理(过100目筛)。然后使用同等大小锡纸对样品进行密封包裹,使用1/1000天平称取净含量约为50 mg(植物群落样品)和100 mg(土壤样品),上下误差在1 mg。利用元素分析仪(仪器型号:Vario MACRO CUBE)测定其TN含量。

植物群落样品采用H₂SO₄-H₂O₂消煮法浸提。土壤采用H₂SO₄-HClO₄消煮法浸提。利用连续流动分析仪(仪器型号:SEAL AutoAnalyzer3)测定其TP含量。

1.2.3 内稳性指数计算 运用生态化学计量内稳性模型^[13]。

$$\log(y) = \log(c) + \frac{1}{H} \log(x),$$

$$\text{即 } y = \frac{1}{H} c x,$$

式中:y代表有机体TN、TP含量及N:P;x代表

土壤 TN、TP 含量及 N:P; c 为参数; H 为内稳性指数, 用其绝对值大小来表示植物群落内稳性强弱, 当 $\frac{1}{H}=0$ 为绝对稳态, $H>4$ 为稳态, $2<H<4$ 为弱稳态, $1.33<H<2$ 为弱敏感态, $H<1.33$ 为敏感态^[14]。

1.3 数据分析

本研究使用 Excel 2024 进行数据的初步处理分析, N、P 以单位质量的养分含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 表示, 植物群落及土壤 TN、TP 数据在 SAS 9.4 软件中进行单因素方差分析及双因素方差分析, 并进行 Duncan 多重比较, 显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。使用 Sigmaplot 14.0 将数据进行拟合后作图。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量及生态化学计量特征

经双因素方差分析结果可知(表 1), 不同放牧处理对 TP 含量有显著影响 ($P<0.05$); 对土壤 N:P 有极显著影响 ($P<0.05$); 土层仅对土壤 TN 含量有显著影响 ($P<0.05$); 载畜率与土层的交互作用对土壤 TN、TP 和 N:P 均无显著影响。

随放牧强度的增大, 土壤 TP 含量先增大后降低, 表现为 $\text{MG}>\text{LG}>\text{HG}>\text{CK}$, 其中 MG 显著高于 CK ($P<0.05$) (图 1-B); 对照区土壤 N:P 极显著高于其他放牧处理 ($P<0.01$) (图 1-C), 为 6.62, LG、MG、HG 较 CK 分别下降了 15%, 26.83%, 18.78%。其中, 0~10 cm 土层 TN 含量显著高于 10~20 cm 与 20~30 cm 土层 ($P<0.05$) (图 1-D)。

表 1 不同载畜率和土层的交互作用对土壤 TN、TP 和 N:P 的影响

Table 1 Effects of interaction between different stocking rate and soil layer on soil TN, TP and N:P

因素 Factor	自由度 Latitude	全氮 TN		全磷 TP		氮磷比 N:P	
		F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
载畜率 Stocking rate	3	1.8500	0.1645	3.8800*	0.0216	8.2800**	0.0006
土层 Soil layer	2	5.4800*	0.0110	0.2900	0.7474	2.1100	0.1430
载畜率×土层 Stocking rate×Soil layer	6	0.2400	0.9567	0.1600	0.9845	0.6400	0.7005

注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$

Note: * $P<0.05$; ** $P<0.01$

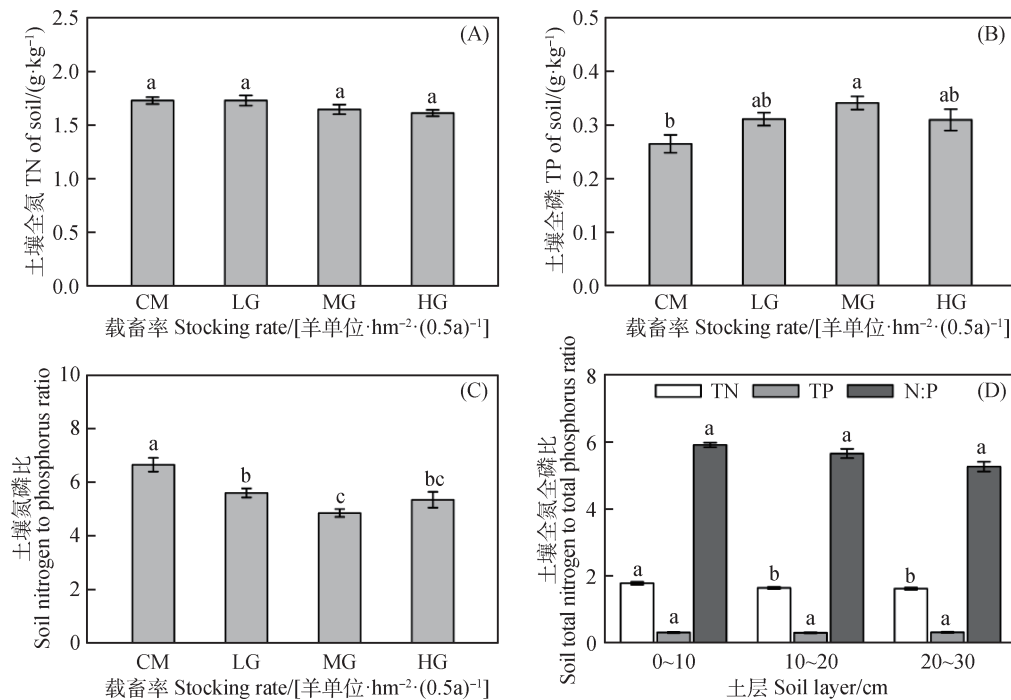


图 1 不同载畜率下不同土层下土壤生态化学计量

Fig. 1 Soil stoichiometry of different soil layers under different stocking rates

注: 不同小写字母表示不同放牧处理及土层间具有显著性差异 ($P<0.05$), 下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level, the same as below

2.2 植物群落养分含量及生态化学计量特征

如图2所示,植物群落TN及TP含量均随载畜率的增加逐渐降低,HG区N:P低于其他放牧处理。HG区,植物群落TN含量极显著低于其他放牧处理($P<0.01$) (图2-A),较CK降低了34.44%,CK, LG, MG间无显著差异,整体变化范围为16.75~25.56 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。TP变化范围为

1.28~1.57 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, HG显著低于CK($P<0.05$) (图2-B),较CK下降了18.59%。随载畜率的增大N:P先升高后降低,变化范围为13.4~17.65, CK, LG, MG间无显著差异, HG显著低于其他放牧处理($P<0.05$) (图2-C),较CK下降了17.54%。放牧显著影响了植物群落TN含量、TP含量及N:P。

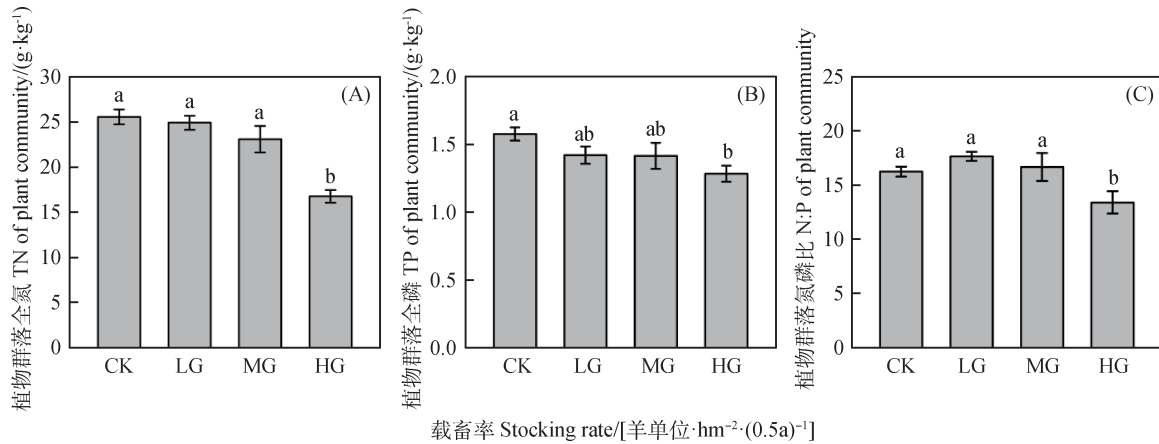


图2 不同载畜率下植物群落生态化学计量

Fig. 2 Stoichiometry of plant communities under different stocking rates

注:不同小写字母表示不同放牧处理间具有显著性差异($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level

2.3 内稳性

2.3.1 植物群落TN内稳性 植物群落TN含量内稳性指数随载畜率的增大而减小,CK区植物群落TN含量对土壤TN的含量变化不敏感, $H=4.81$,具有较强的内稳性调节能力(图3-A)。LG, MG区H分别为1.9, 1.57,其植物群落TN内稳性调节较弱,均属于弱敏感态(图3-B, C)。HG区植物群落TN含量对土壤TN含量的变化敏感, $H=0.84$,缺乏内稳性调节,为敏感态(图3-D)。重度放牧严重影响了植物群落TN的稳态调节。

将载畜率(X)与 H_{TN} 进行拟合($H_{TN}=0.6649X^2-3.1553X+4.6624$, $R^2=0.9512$)可得,当载畜率小于0.22或大于4.53时,植物群落TN内稳性处于稳态,小于1.1或大于3.65时处于弱稳态,1.59~3.15时为敏感态。

2.3.2 植物群落TP内稳性 植物群落TP内稳性指数随载畜率的增大呈下降趋势,CK区 $H=4.58$,植物群落TP具有较强的稳态调节能力(图4-A)。LG区 $H=2.39$,稳态调节较弱,属于弱稳态(图4-B)。MG区 $H=1.3$,植物群落TP对土壤TP变化敏感,为敏感态(图4-C)。HG区植物群落TP对土壤TP

变化同样敏感, $H=1.95$,属于弱敏感态(图4-D)。在HG区内稳性指数有所增大,但始终小于CK和LG,由此可见,放牧降低了植物群落TP的稳态调节能力。

将载畜率(X)与 H_{TP} 进行拟合($H_{TP}=0.8603X^2-3.3331X+4.6148$, $R^2=0.9966$)可得,当载畜率小于0.19或大于3.68时,植物群落TP内稳性为稳态,小于1.09或大于2.78时处于弱稳态。1.09~2.78处于弱敏感态。

2.3.3 植物群落N:P内稳性 植物群落N:P内稳性调节在MG区最强, $H=2.49$,与CK区同属于弱稳态调节(图5-C, 5-A), $H=2.02$;LG区 $H=1.87$,稳态调节弱,属于弱敏感态(图5-B);HG区缺乏内稳性调节, $H=1.00$,属于敏感态(图5-D)。由此可见,中度放牧增强了植物群落N:P内稳性调节;在CK区和LG区,植物群落均具有一定的稳态调节能力;重度放牧则减弱了N:P的稳态调节。

将载畜率与 $H_{N:P}$ 进行拟合($H_{N:P}=-0.4129X^2+0.8517X+1.8703$, $R^2=0.6336$)可得,当载畜率在0.17~1.9之间,轻中度放牧下为弱稳态,0~0.17或1.9~2.57为弱敏感态,大于2.57为敏感态。

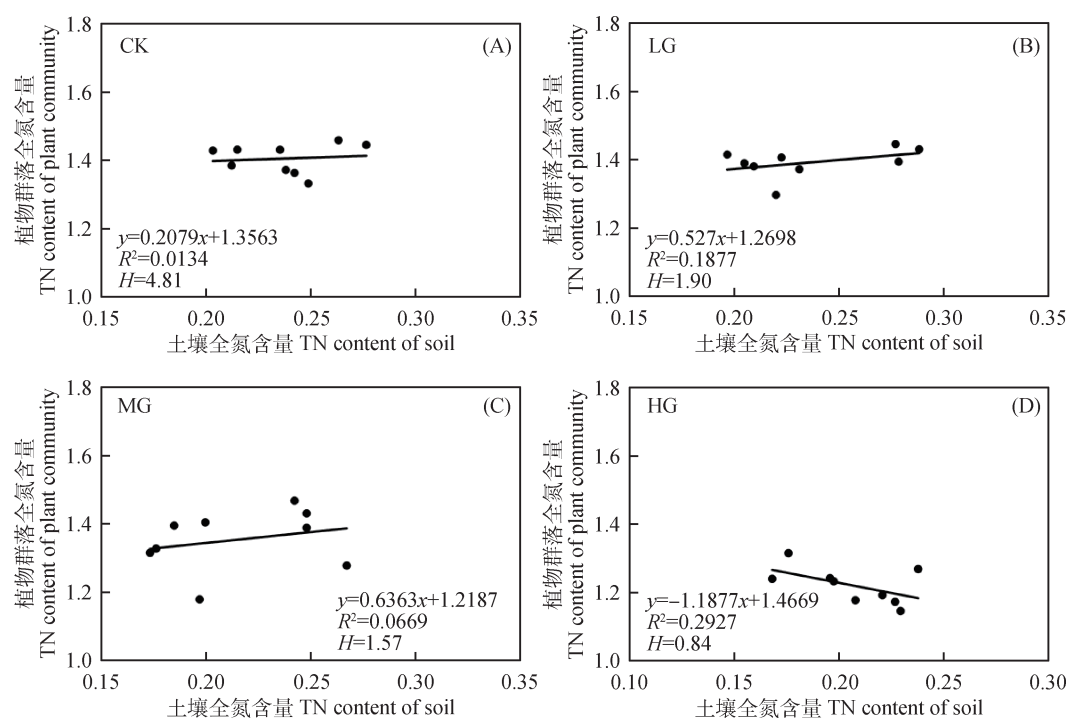


图 3 不同载畜率下植物群落全氮内稳性

Fig. 3 TN homeostatic of plant communities under different stocking rates

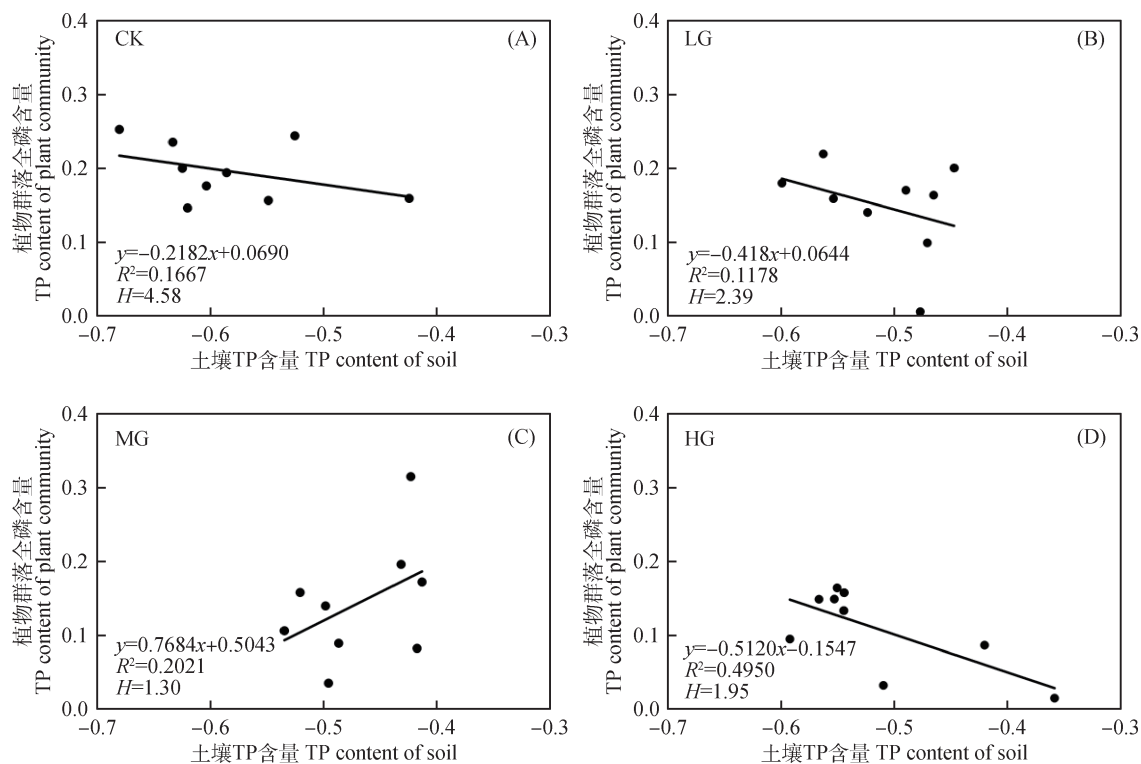


图 4 不同载畜率下植物群落全磷内稳性

Fig. 4 TP homeostatic of plant communities under different stocking rates

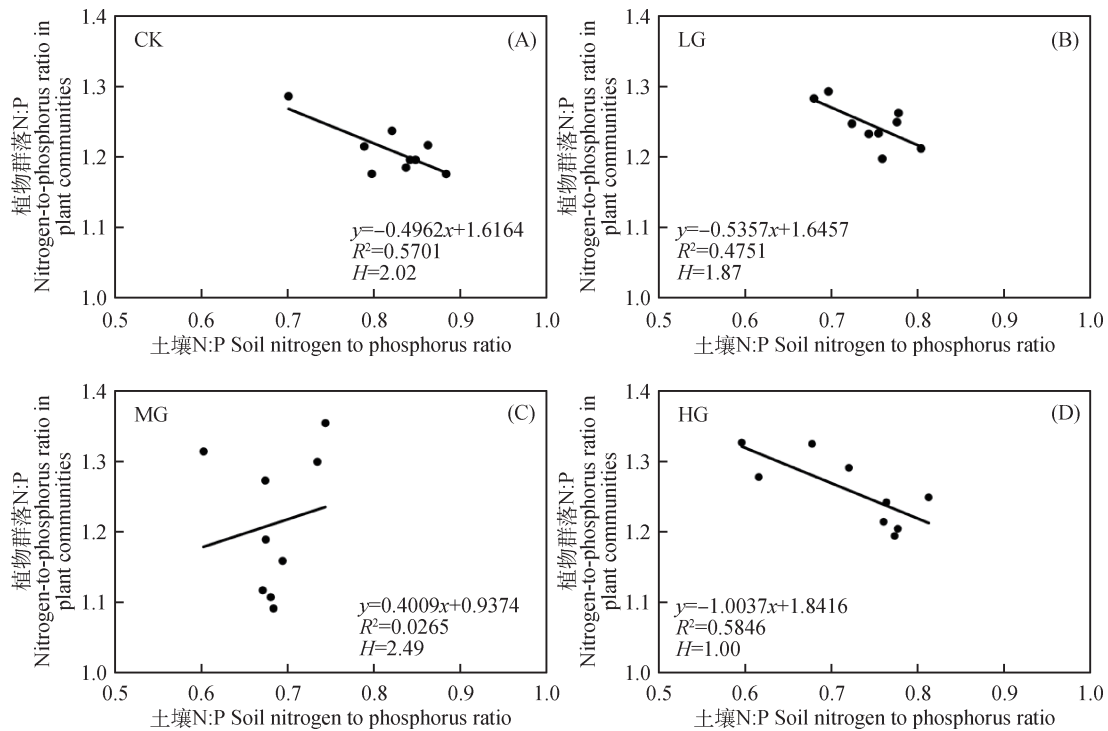


图5 不同载畜率下植物群落N:P内稳性

Fig. 5 N:P ratios homeostatic of plant communities under different stocking rates

3 讨论

3.1 不同载畜率下土壤生态化学计量

荒漠草原气候干旱,植物种类较少且植被低矮,放牧是其主要利用方式。草-土-畜,作为一个相互作用和制约的整体,土壤养分与植物生长密切相关,家畜采食、践踏与排泄也会直接作用于草和土。

牲畜的粪便和尿液沉积可直接调节土壤养分,增加土壤氮素,在本研究中,0~10 cm表层土壤TN含量最高,与杨林等^[15]在克氏针茅种群生境下的土壤研究结果一致。但由于排泄物的分解需要一定时间,发现放牧对土壤TN含量影响不显著,与Hassan等^[16]在东北典型草原下的研究结果一致。

岩石风化是P的主要输入途径,输出通过地表径流、风蚀和淋溶^[17]。内蒙古荒漠草原气候干旱,风沙活动剧烈,长期过度放牧会破坏植被和土壤结构,加剧风蚀,导致重度放牧下土壤TP含量降低^[18]。轻中度放牧则降低土壤容重,有利于养分积累,中度放牧处理下土壤TP含量较高^[19]。其中,放牧对土壤物理性质的改变,增强了N、P矿化作用,土壤P含量从而增加^[20]。呼伦贝尔草甸草原的研究中,放牧和围封草地间土壤TP无显著差异^[21]。典型草原中,放牧强度与土壤TP含量无显著相关性,且放牧样地更缺P^[22],可能是因为排除了风蚀造成

的P流失。李岚^[23]研究发现,放牧降低了土壤N:P,与本研究结论一致。

目前,放牧对草地土壤养分含量的影响尚无定论。综合研究可知,不同草原类型的土壤对放牧响应不同,而且各研究的载畜率、放牧家畜不同,结论也不同。

3.2 不同载畜率下植物群落生态化学计量

本研究发现,不同载畜率下植物群落N:P分别为16.25,17.65,16.67,13.4。依据“植物N:P<14受N限制,N:P>16受P限制,14~16间受N、P共同限制或均不缺”的判断方法^[10,24],可知CK, LG, MG区植物受P限制, HG区受N限制。HG区植物因受N限制未补偿生长, TN含量下降。

丁莉君等^[25]在内蒙古荒漠草原的研究显示,放牧对群落TP含量影响不显著且整体降低,与本研究结果相符。其他草原研究表明,除羊草外,放牧会增加草甸草原叶片N含量与N:P、典型草原群落及叶片N、P含量^[23,26],在高寒草甸还会增加植物叶片N、P含量。本研究中重度放牧时N:P降低,表明植物采取快速生长策略^[27]。王娅林等^[28]发现,重度放牧使退化指示植物生长加快,侵占优质牧草生态位,减缓草地养分流失。典型草原和高寒草甸P变化与荒漠草原相反,源于草地类型和研究尺度差

异。可见,不同草地类型、研究尺度和环境状态下,草原对放牧的响应不同。

此外,有研究表明,温度和降水都会影响土壤P转化和植物体对P的吸收,2018—2022年,8月降水量均值为 (72.3 ± 18.6) mm,放牧强度增大,土壤含水量减小,植物中的P含量随土壤水分减小而减小^[29]。

3.3 内稳性

植物会调节自身生物量分配和对N,P元素的养分利用来适应生态系统退化带来的不利影响。本研究中,放牧降低了植物群落TN内稳性。在庾强等^[30]的研究中,随放牧强度增加,高 H_N 物种通常被抑制,低 H_N 物种被促进,与HG区,重度放牧明显降低了植物群落TN内稳性的结论一致。当载畜率大于4.53时,TN内稳性处于稳态,可能当载畜率过高时,植物群落进入了另一种状态下的动态平衡。总体来看,当载畜率小于1.1或大于3.65时,植物群落TN含量具有弱稳态调节能力。载畜率 X 对 H_{TN} 存在一个最小阈值,即当 $X=2.37$ 时, H_{TN} 最小,为0.92,内稳性最弱,植物群落TN内稳性处于敏感态。对于 $X<2.37$ 或 $X>2.37$, H_{TN} 增大,即内稳性增强。

有研究表明,较高的地上组织营养浓度与稳态的降低相关,化学计量稳态更强的植物,对于营养的利用更保守^[8]。重牧下地上部低P浓度对于内稳性高的植物更容易吸收利用,所以增强了TP内稳性。这可能也与长期重牧胁迫下,正相互作用在群落中占据主要作用和负相互作用在放牧胁迫较小的恢复群落中占据主要作用有关^[31]。可能在轻中度放牧下,负相互作用占主导,所以群落TP都处于弱稳态或弱敏感态。总体来看,当载畜率小于1.09或大于2.78时,植物群落TP含量具有弱稳态调节能力。载畜率 X 对 H_{TP} 存在一个最小阈值,即当 $X=1.94$ 时, H_{TP} 最小,为1.39,内稳性最弱,植物群落TP内稳性处于弱敏感态。对于 $X<1.94$ 或 $X>1.94$, H_{TP} 的值都会增加,即内稳性增强。

本研究结果也可能与放牧地的退化演替有关,HG区银灰旋花等退化指示植物明显增加,物种通过减小体形、进行生态位位移的方法,抵御采食和践踏;退化指示植物的快速进入减少了养分流失,补偿了N诱导的物种损失,并在群落水平上保持了物种丰富度的相对稳定性^[28,32]。P添加实验中,相

同处理下,入侵种的P内稳性高于其他种^[33]。这可能也是重牧区植物群落TP内稳性增大的原因之一。当载畜率为0.17~1.9时,植物群落具有一定的N:P稳态调节能力。载畜率 X 对 $H_{N:P}$ 存在一个最大阈值,即当 $X=1.03$ 时, $H_{N:P}$ 最大,为2.3,内稳性最强,植物群落N:P内稳性处于弱稳态。对于 $X<1.03$ 或 $X>1.03$, $H_{N:P}$ 减小,即内稳性减弱。

中度放牧下N:P内稳性最强,这与生态系统的稳定性或物种恢复力密切相关。重度放牧下低 H_N 和高 H_P 下保守的营养利用策略,与应对气候变化的抵抗力密切相关;以上特征对于干旱和贫瘠环境中的群落至关重要^[34]。此外,在荒漠草原,除了放牧以外的人为干扰,土壤风蚀作为不可轻视的一大因素,在本研究中尚未考虑。风蚀是风力作用下地表物质发生位移的现象^[35]。土壤风蚀可吹蚀地表大量有机质和养分,进而影响植物中的养分元素含量。若将风蚀物的收集和分析添加到荒漠草原内稳性研究之中,将会完善整个草地生态系统营养物质流动全过程。由此可见,荒漠草原植物群落内稳性,与植物本身养分利用策略、种间正负相互作用,以及放牧地的环境因素和退化演替有关。

4 结论

本研究发现,土层仅影响土壤TN含量,0~10 cm土层TN含量最高。随放牧强度增大,土壤N:P呈下降趋势,植物群落TN,TP和N:P均降低。在中度放牧下土壤TP含量最高,植物群落N:P内稳性最强。放牧降低了植物群落TN和TP内稳性,载畜率对 H_{TN} 和 H_{TP} 均存在一个最小阈值,分别为2.37和1.94; $H_{N:P}$ 存在一个最大阈值1.03。当载畜率为0.17~1.09,即轻中度放牧时,草地生态系统具有一定的稳态调节能力。

参考文献

- [1] ELSER J J. Ecological stoichiometry: from sea to lake to land[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2000, 15(10): 393-394
- [2] KOIJIMAN S A L M. The stoichiometry of animal energetics[J]. Journal of Theoretical Biology, 1995, 177(2): 139-149
- [3] 曾德慧,陈广生. 生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019
- [4] ZENG D H, CHENG G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(6): 1007-1019
- [5] JEYASINGH P D, WEIDER L J, STERNER R W. Geneti-

- cally-based trade-offs in response to stoichiometric food quality influence competition in a keystone aquatic herbivore[J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(11):1229-1237
- [5] CHEN Z F, ZHOU J J, LAI S B, et al. Species differences in stoichiometric homeostasis affect grassland community stability under N and P addition[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(22):61913-61926
- [6] HESSEN D O, ÅGREN G I, ANDERSON T R, et al. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry[J]. *Ecology*, 2004, 85(5):1179-1192
- [7] YU Q, CHEN Q S, ELSER J J, et al. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability[J]. *Ecology Letters*, 2010, 13(11):1390-1399
- [8] YU Q, ELSER J J, HE N P, et al. Stoichiometric homeostasis of vascular plants in the Inner Mongolia grassland[J]. *Oecologia*, 2011, 166(1):1-10
- [9] GÜSEWELL S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *The New Phytologist*, 2004, 164(2):243-266
- [10] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6):1441
- [11] 王森, 张宇, 李瑞强, 等. 放牧强度对羊草草甸草原植物器官及群落氮磷化学计量的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(7):1371-1384
- WANG M, ZHANG Y, LI R Q, et al. Effects of grazing disturbance on the stoichiometry of nitrogen and phosphorus in plant organs of *Leymus chinensis* meadow steppe[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(7):1371-1384
- [12] 陈海军. 荒漠草原主要植物种群繁殖性状及化学计量特征对载畜率的响应[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011:116-119
- CHEN H J. The response of reproductive characteristics and ecological stoichiometry of main plant population to stocking rate in Inner Mongolia desert steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011:116-119
- [13] STERNER R W, ELSER J J. *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements From Molecules to The Biosphere*[M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2002:15-18
- [14] PERSSON J, FINK P, GOTO A, et al. To be or not to be what you eat: regulation of stoichiometric homeostasis among autotrophs and heterotrophs[J]. *Oikos*, 2010, 119(5):741-751
- [15] 杨林, 马秀枝, 李依倩. 放牧对荒漠草原克氏针茅种群和土壤生态化学计量特征的影响[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(2):328-334
- YANG L, MA X Z, LI Y Q. Effects of grazing on ecological stoichiometry of *Stipa krylovii* and soil in desert grassland[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(2):328-334
- [16] HASSAN N, LI X F, WANG J Y, et al. Effects of grazing on C: N: P stoichiometry attenuate from soils to plants and insect herbivores in a semi-arid grassland[J]. *Oecologia*, 2021, 195(3):785-795
- [17] 周强, 姜允斌, 郝记华, 等. 磷的生物地球化学循环研究进展[J]. *高校地质学报*, 2021, 27(2):183-199
- ZHOU Q, JIANG Y B, HAO J H, et al. Advances in the study of biogeochemical cycles of phosphorus[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(2):183-199
- [18] 李永强. 不同载畜率对短花针茅荒漠草原土壤风蚀的影响及作用机制[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2016:8-10
- LI Y Q. Effect of different stocking rates on the characteristic and mechanism of soil wind erosion in a *Stipa breviflora* desert steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016:8-10
- [19] 赵美曼. 荒漠草原不同放牧强度土壤理化特性及可蚀性的空间分布[D]. 泰安:山东农业大学, 2022:40-41
- ZHAO M M. Spatial distribution of soil physical-chemical characteristics and erodibility of desert steppe with different grazing intensities[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022:40-41
- [20] 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[J]. *草业学报*, 2018, 27(12):94-102
- AN Y, AN H, LI S B. Effects of grazing on ecological stoichiometry of soil and dominant plants in desert grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(12):94-102
- [21] 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
- DING X H, GONG L, WANG D B, et al. Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mogolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15):4722-4730
- [22] 卢晓霞, 张卫青, 王海茹, 等. 放牧强度对内蒙古典型草原土壤磷素的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(5):153-159
- LU X X, ZHANG W Q, WANG H R, et al. Effects of grazing intensity on soil phosphorus in typical grassland of Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(5):153-159
- [23] 李岚. 滩羊放牧对典型草原生态化学计量特征和多功能性的影响[D]. 兰州:兰州大学, 2021:91-96
- LI L. Effects of Tan-sheep grazing on C: N: P stoichiometry and multifunctionality of typical steppe[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021:91-96
- [24] GÜSEWELL S. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants[J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2002, 5(1):37-61
- [25] 丁莉君, 卫智军, 张爽, 等. 放牧强度季节调控对荒漠草原土壤和植物养分的影响[J]. *草原与草业*, 2019, 31(1):53-59
- DING L J, WEI Z J, ZHANG S, et al. Effects of seasonal regulation of grazing intensity on Soil and plant nutrients in desert steppe[J]. *Grassland and Prataculture*, 2019, 31(1):53-59
- [26] 孙超. 基于生态化学计量学的草地退化研究[D]. 长春:吉林大学, 2012:39-42
- SUN C. Study on grassland degeneration based on ecological stoichiometry[D]. Changchun: Jilin University, 2012:39-42
- [27] 高巧静, 朱文琰, 侯将将, 等. 放牧强度对高寒草甸植物叶片

- 生态化学计量特征的影响[J]. 中国草地学报, 2019, 41(3): 45-50
- GAO Q J, ZHU W Y, HOU J J, et al. Effects of grazing intensity on ecostochiometric characteristics of plant leaves in Alpine meadow [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(3): 45-50
- [28] 王娅琳, 朱文琰, 侯将将, 等. 放牧对贵南县 4 种退化指示植物叶片性状的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(3): 423-431
- WANG Y L, ZHU W Y, HOU J J, et al. Effects of grazing on leaf traits of four degraded indicator plants in Guinan[J]. Prata-cultural Science, 2020, 37(3): 423-431
- [29] 何敏, 许秋月, 夏允, 等. 植物磷获取机制及其对全球变化的响应[J]. 植物生态学报, 2023, 47(3): 291-305
- HE M, XU Q Y, XIA Y, et al. Plant phosphorus acquisition mechanisms and their response to global climate changes [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(3): 291-305
- [30] YU Q, WILCOX K, LA PIERRE K, et al. Stoichiometric homeostasis predicts plant species dominance, temporal stability, and responses to global change[J]. Ecology, 2015, 96(9): 2328-2335
- [31] 王鑫厅, 柴静, 姜超, 等. 典型草原大针茅种群空间格局及对长期过度放牧的响应[J]. 生物多样性, 2020, 28(2): 128-134
- WANG X T, CHAI J, JIANG C, et al. Population spatial pattern of *Stipa grandis* and its response to long-term overgrazing [J]. Biodiversity Science, 2020, 28(2): 128-134
- [32] 张娜, 秦艳, 金轲, 等. 放牧对典型草原群落特征及土壤物理性状的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(4): 91-100
- ZHANG N, QIN Y, JIN K, et al. Effects of grazing on vegetation community and soil physical properties in typical steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(4): 91-100
- [33] 程艳艳. 化学计量内稳性与毛竹入侵生态系统稳定性关系的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014: 4-10
- CHENG Y Y. Study on the relationship between stoichiometric homeostasis and stability of forest ecosystem invaded by moso bamboo [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2014: 4-10
- [34] HOOVER D L, KNAPP A K, SMITH M D. Resistance and resilience of a grassland ecosystem to climate extremes [J]. Ecology, 2014, 95(9): 2646-2656
- [35] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方. 土壤风力侵蚀研究现状与进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(3): 288-295
- HU Y F, LIU J Y, ZHUANG D F. Progress in wind erosion research [J]. Progress in Geography, 2003, 22(3): 288-295

(责任编辑 刘婷婷)