

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.019

引用格式:魏凯强,王萌韬,周雨静,等.不同利用方式下温性草甸草原植物多样性与表层土壤磷活化系数的关系[J].草地学报,2026,34(9):3354-3364

WEI Kai-qiang, WANG Meng-tao, ZHOU Yu-jing, et al. Relationship Between Plant Diversity and Topsoil Phosphorus Activation Coefficient of Temperate Meadow Steppe Under Different Utilization Regimes[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3354-3364

不同利用方式下温性草甸草原植物多样性 与表层土壤磷活化系数的关系

魏凯强¹, 王萌韬¹, 周雨静¹, 刁兆岩², 贺晶^{1*}

(1. 北京林业大学生态与资源研究中心, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:为揭示不同利用方式对温性草甸草原植物多样性与土壤磷素关系的调控机制,本研究以辉河国家级自然保护区内的草地为对象,系统比较了放牧、刈割和围封模式下植物多样性指标及表层土壤磷活化系数(Phosphorus activation coefficient, PAC)的响应特征。结果表明:植物多样性对利用方式的响应显著。刈割下的物种数、Margalef丰富度指数、Simpson指数与Shannon-Wiener指数均显著高于围封与放牧($P < 0.05$),围封又显著高于放牧;Pielou均匀度指数仅刈割显著高于放牧($P < 0.05$)。土壤磷素及有效性因利用方式而异。土壤全磷(Total phosphorus, TP)含量刈割显著高于围封和放牧($P < 0.05$);放牧显著提高了表层土壤有效磷(Available phosphorus, AP)含量与PAC($P < 0.05$)。植物多样性与土壤磷素的关系受利用方式调控。围封下,AP与所有多样性指数均呈显著负相关,PAC与多数指数显著负相关;放牧下,TP与Margalef丰富度指数显著负相关性,而与Pielou指数显著正相关,AP仅与Margalef丰富度指数呈负相关;刈割下,土壤各磷指标与植物多样性各指数均无显著相关性。综上,利用方式不仅独立影响植物多样性与土壤磷有效性,更调控着二者之间的关系。

关键词:温性草甸草原;物种构成;植物多样性;有效磷;磷活化系数

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3354-11

Relationship Between Plant Diversity and Topsoil Phosphorus Activation Coefficient of Temperate Meadow Steppe Under Different Utilization Regimes

WEI Kai-qiang¹, WANG Meng-tao¹, ZHOU Yu-jing¹, DIAO Zhao-yan², HE Jing^{1*}

(1. Center for Grassland Resources and Ecology Research, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: To reveal the regulatory mechanisms of different utilization methods on the relationship between plant diversity and soil phosphorus in temperate meadow steppe, this study selected the grassland within the Huihe National Nature Reserve as the object and systematically compared the response characteristics of plant diversity indicators and surface soil phosphorus activation coefficient (PAC) under grazing, mowing, and enclosure modes. The results showed that plant diversity responded significantly to the utilization methods. The number of species, Margalef index, Simpson index, and Shannon-Wiener index under mowing were significantly higher than those under enclosure and grazing ($P < 0.05$), and enclosure was significantly higher than grazing; the Pielou evenness index was only significantly higher under mowing than grazing ($P < 0.05$). Soil phosphorus and its availability varied depending on the utilization methods. The content of total soil phosphorus (TP) under mowing was significantly higher than that under enclosure and grazing ($P < 0.05$); grazing significantly

收稿日期:2025-09-28;修回日期:2025-11-11

基金项目:国家自然科学基金(32201335)资助

作者简介:魏凯强(2000-),男,汉族,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事草地资源与生态研究,E-mail:2179067537@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:hejing_606@163.com

increased the content of surface soil available phosphorus (AP) and PAC ($P < 0.05$). The relationship between plant diversity and soil phosphorus was regulated by the utilization methods. Under enclosure, AP was significantly negatively correlated with all diversity indices, and PAC was significantly negatively correlated with most indices; under grazing, TP was significantly negatively correlated with the Margalef index, while significantly positively correlated with the Pielou index, and AP was only negatively correlated with the Margalef index; under mowing, there was no significant correlation between soil phosphorus indicators and plant diversity indices. In summary, the utilization methods not only independently affected plant diversity and soil phosphorus availability, but also regulated the relationship between them.

Key words: Temperate meadow steppe; Species composition; Plant diversity; Available phosphorus; P activation coefficient

呼伦贝尔草原总面积为714.81万 hm^2 ,其中温性草甸草原面积为139.83万 hm^2 ,占呼伦贝尔草原总面积的19.56%,是该地区第二大草原类型^[1]。近年来,在气候变化与不合理利用的双重压力下,呼伦贝尔草原整体面临着植物资源锐减、生物量与多样性下降的严峻挑战^[2-3],草原生态系统功能退化、生产力降低,进一步加剧了草原退化、沙化和盐碱化进程^[4-6]。作为重要组成部分的温性草甸草原,其面积近年来也在不同程度地缩减,相当一部分已向典型草原转化且趋势持续^[1, 7-8],这种草原类型的转化直接引发了植物多样性和土壤性质的演变,其驱动因素与具体的利用方式密切相关。

草地利用方式是影响植物群落结构和功能的关键人为因子。多数研究表明,重度放牧利用往往会降低植物的种类和数量^[9],而刈割^[10]与围封利用^[11-12]则有助于提高植物种类和数量,因此在草地出现退化迹象时,常通过减少放牧或实施封育来促进植被恢复。进一步地,围封和刈割草地的Margalef丰富度指数、Simpson指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数通常显著高于放牧草地,说明刈割和适度年限的围封更有利于维持较高的植物多样性水平^[13]。在土壤磷素方面,利用方式同样引起显著差异。有研究指出,在温性草甸草原中,放牧利用在降低全磷含量的同时提高了有效磷含量和磷的利用效率^[14-15];围封利用则可能导致土壤全磷与有效磷均下降^[16];刈割利用则有助于提高土壤全磷,其有效磷含量多介于围封与放牧之间^[15]。然而,也有部分研究得出不同结论,如放牧可能增加全磷却降低有效磷^[17-18],而围封反而提高有效磷^[19-20],显示该领域仍存在一定争议。土壤磷素作为植物生长的关键限制因子,与植物多样性之间存在密切关联,且不同利用方式下其影响程度可能有所不同^[21]。但目前关于不同利用方式下温性草甸草原土壤磷活化系数(Phosphorus activation coefficient, PAC)对植物多样性影

响的研究仍较缺乏,这制约了对该生态系统磷循环机制的理解以及草原资源的合理规划与管理。

因此,本研究以辉河国家级自然保护区内的温性草甸草原为研究对象,通过野外样品采集与室内分析相结合,系统比较放牧、刈割和围封三种利用方式下表层土壤磷指标及植物多样性的变化特征,旨在揭示利用方式对温性草甸草原土壤磷活化系数与植物多样性关系的影响,以期为温性草甸草原的科学保护和合理利用提供理论依据和实践支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古自治区呼伦贝尔市西南部的辉河国家级自然保护区境内(图1)。该保护区总面积3468.48 km^2 ,地理坐标为48°05′10″~49°17′00″N, 118°30′47″~119°45′27″E。海拔平均高度650~700 m,行政区划上隶属于鄂温克族自治旗,由辉河国家级自然保护区管理局负责管理。区域气候属中温带大陆性季风气候,年平均气温-2.4~2.2℃,年平均无霜期100~120 d,年降水量300~500 mm,年平均地表蒸发量1200~1700 mm。其中夏季(6—8月)降水较为集中,这一时期的平均气温为19.3℃。春季多风少雨,秋季降温迅速,年内与日内温差均较大,7月为最热月份。地带性土壤以黑钙土和栗钙土为主,受自然条件影响,区域内亦间断分布有隐域性土壤,包括草甸沼泽土、盐化草甸土和风沙土等。植被群落优势种包括贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、麻花头(*Klasea centauroides*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和寸草苔(*Carex duriuscula*)等。

1.2 样品采集

2024年7月,在辉河自然保护区内的温性草甸草原上采用网格布点法选取15个30 m×30 m试验样地,

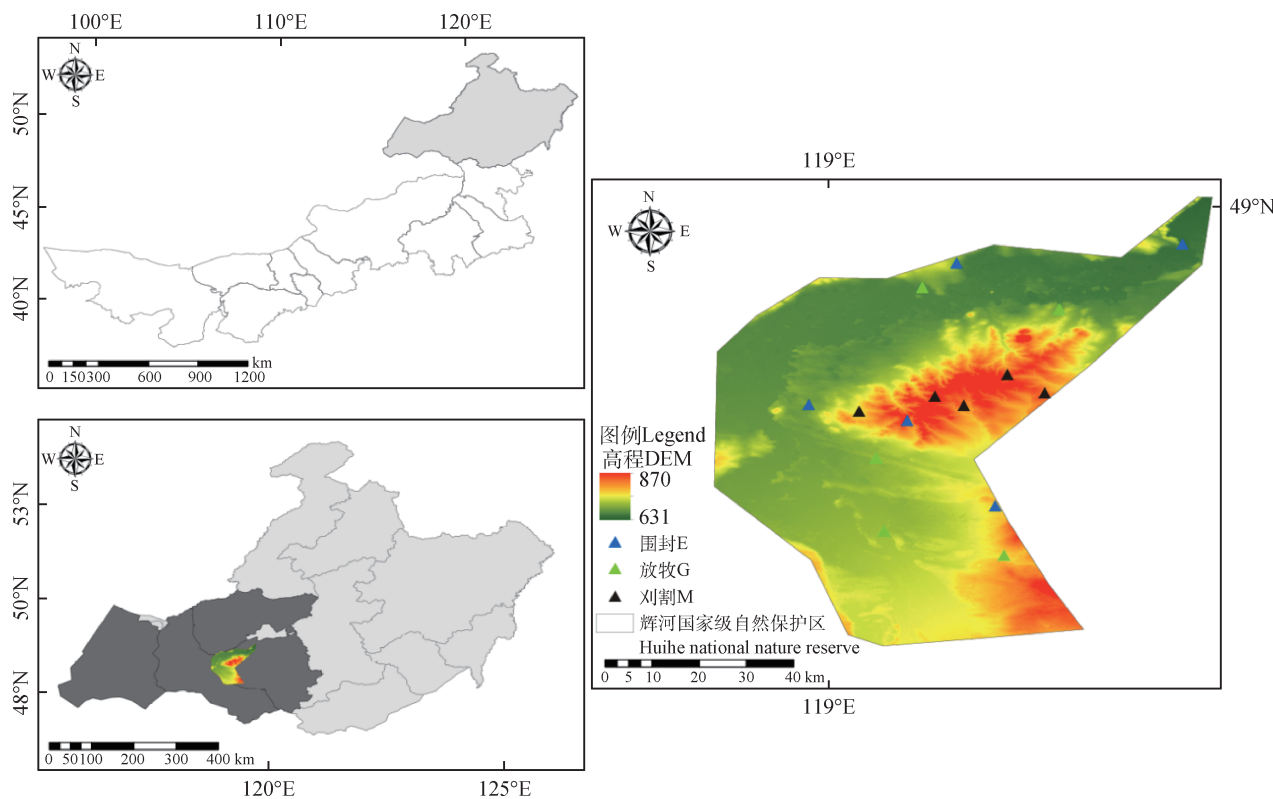


图 1 研究区样点图

Fig. 1 Sample plot of study area

包括5个放牧样地(Grazing,G)、5个刈割样地(Mowing,M)和5个围封样地(Enclosure,E)(表1)。放牧样地为自由放牧,放牧量为 $1.5\sim3.0$ 羊单位 $\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,根据《天然草地合理载畜量的计算》和鄂温克族自治旗载畜量调查,放牧程度判定为中度放牧,放牧时间均为暖季放牧,即5—10月,放牧地为10年以上的持续放牧;刈割样地每年8月机械刈割一次,刈割留茬高度5 cm,刈割地也为10年以上的持续刈割;

围封样地围封年限为8~15年,围封地围封前为放牧利用。7月5日至7月15日间,在每个样地内设置3个 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 的样方,调查并记录物种组成、高度、盖度、密度和生物量。其中,物种高度为植物自然高度,盖度采用针刺法测定,生物量为植物干重;丛生型植物密度以分株数计;非丛生型植物密度为植物个体数。每个样方内同步采集0~20 cm深度的混合土壤样品1份。

表 1 研究区概况

Table 1 Information of study area

样地类型 Sample plot type	编号 Plot number	利用时间 Utilization time/a	优势种 Dominant species	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m
围封 Grazing	1	8	贝加尔针茅 <i>Stipa baicalensis</i>	119°19'01.95"E	48°25'47.23"N	721
	2	10	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	119°08'58.61"E	48°35'31.28"N	816
	3	11	贝加尔针茅 <i>Stipa baicalensis</i>	118°57'42.79"E	48°37'20.44"N	661
	4	13	贝加尔针茅 <i>Stipa baicalensis</i>	119°40'26.94"E	48°55'46.78"N	728
	5	15	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	119°14'39.02"E	48°53'30.55"N	675
刈割 Mowing	1	>10	贝加尔针茅 <i>Stipa baicalensis</i>	119°15'26.87"E	48°37'13.32"N	774
	2	>10	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	119°12'09.76"E	48°38'19.82"N	825
	3	>10	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	119°24'42.76"E	48°38'41.59"N	774
	4	>10	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	119°20'27.74"E	48°40'49.65"N	798
	5	>10	贝加尔针茅 <i>Stipa baicalensis</i>	119°03'29.64"E	48°36'36.71"N	706
放牧 Enclosure	1	>10	星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i>	119°20'02.22"E	48°20'04.22"N	707
	2	>10	寸草 <i>Carex duriuscula</i>	119°06'21.26"E	48°22'54.09"N	675
	3	>10	星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i>	119°05'28.11"E	48°31'09.55"N	669
	4	>10	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	119°26'21.83"E	48°48'13.65"N	658
	5	>10	大叶章 <i>Deyeuxia purpurea</i>	119°10'42.91"E	48°50'46.58"N	639

1.3 指标测定与计算

处理后的土壤样品(阴干、过100目筛)其总磷(Total phosphorus, TP)和有效磷(Available phosphorus, AP)含量分别依据碱熔-钼锑抗分光光度法和碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法进行测定。

土壤磷活化系数(ρ_{PAC})公式^[22]如下:

$$\rho_{\text{PAC}} = \frac{\rho_{\text{AP}}}{\rho_{\text{TP}} \times 1000} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ρ_{PAC} 为磷活化系数, ρ_{AP} 为有效磷的质量浓度,单位为毫克每千克($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), ρ_{TP} 为总磷的质量浓度,单位为克每千克($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $\times 1000$ 为单位换算系数,将分母单位从克每千克($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)转换为毫克每千克($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), $\times 100\%$ 为将结果转换为百分数。

其次,本研究分别从植物科的数目、功能群组成、植物多样性及土壤磷活化系数四个层次,综合分析不同利用方式对温性草甸草原植物多样性的影响。植物物种的中文名、拉丁学名及其属名、科名均依据《中国植物志》进行核定。植物功能群组划分为五类:灌木和半灌木、多年生丛生禾草、多年生根茎禾草、多年生杂类草及一二年生植物^[23]。

不同利用方式下植物多样性使用以下公式进行计算^[24]。

$$\text{Margalef 丰富度指数 } M = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (2)$$

$$\text{Simpson 指数 } D = 1 - \sum P_i^2 \quad (3)$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数 } H = -\sum (P_i \times \ln P_i) \quad (4)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数 } J = \frac{H}{\ln S} \quad (5)$$

式中, S 为不同利用方式下所有样方的物种总数。 P_i 为某放牧强度下物种 i 的重要值,计算为相对高度、相对盖度和相对密度的平均值,其中相对高度为物种 i 的高度与某处理下所有物种的高度总和的比值;相对盖度为物种 i 的盖度与某处理下所有物种的盖度总和的比值;相对密度为物种 i 的密度与某处理下所有物种的密度总和的比值。 N 为物种 i 所在各处理的所有物种的个体总数。

1.4 数据处理

采用单因素方差分析(ANOVA)比较不同利用方式在植物多样性指数以及土壤磷指标(AP, TP, PAC)上的差异,并利用LSD法进行多重比较。使用一元线性回归分析土壤磷指标(TP, AP, PAC)与植物多样性指数的关系。数据均通过正态性和方差齐性检验,结果以“平均值 $\pm$ 标准误”表示,统计

显著性水平设定为0.05。所有分析在SPSS 27.0中完成,图表由Origin 2022生成。

2 结果与分析

2.1 温性草甸草原不同利用方式下群落物种组成特征及植物物种重要值

不同利用方式对温性草甸草原植物多样性在科级水平和功能层均产生影响。在科的数量上,刈割与围封利用草地均为21科,高于放牧草地的11科。菊科、禾本科、豆科和蔷薇科作为物种数较多的优势科,在不同利用方式下均稳定存在。特有科分布呈现利用方式差异:放牧草地特有科为白花丹科和蓼科,刈割草地特有科包括大戟科、堇菜科、桔梗科、檀香科和苋科,围封草地特有科则为龙胆科、瑞香科、十字花科、旋花科、亚麻科和鸢尾科(表2)。

表2 温性草甸草原不同利用方式下科的数目

Table 2 The number of families in temperate meadow steppe under different utilization methods

科 Family	围封 Enclosure	刈割 Mowing	放牧 Grazing
白花丹科 Plumbaginaceae	0	0	1
百合科 Liliaceae	1	1	0
车前科 Plantaginaceae	1	4	3
唇形科 Lamiaceae	2	2	0
大戟科 Euphorbiaceae	0	1	0
豆科 Fabaceae	8	7	4
禾本科 Poaceae	9	7	8
堇菜科 Violaceae	0	1	0
景天科 Crassulaceae	1	3	0
桔梗科 Campanulaceae	0	1	0
菊科 Asteraceae	11	16	6
蓼科 Polygonaceae	0	0	1
列当科 Orobanchaceae	1	1	0
龙胆科 Gentianaceae	1	0	0
毛茛科 Ranunculaceae	2	3	1
茜草科 Rubiaceae	1	1	0
蔷薇科 Rosaceae	8	6	6
瑞香科 Thymelaeaceae	1	0	0
伞形科 Umbelliferae	2	1	0
莎草科 Cyperaceae	4	3	1
十字花科 Brassicaceae	1	0	0
石蒜科 Amaryllidaceae	4	5	3
石竹科 Caryophyllaceae	1	2	1
檀香科 Santalaceae	0	1	0
苋科 Amaranthaceae	0	1	0
旋花科 Convolvulaceae	1	0	0
亚麻科 Linaceae	1	0	0
鸢尾科 Iridaceae	2	3	0
总计 Total	63	70	35

从植物功能群组成来看,三种利用方式下多年生杂类草的物种数均居首位,其中刈割草地最多(51

种),围封和放牧草地分别为38和21种。围封草地的多年生禾草物种数最多(13种),高于放牧草地(9种)。灌木和半灌木植物种以围封草地最多(8种),刈割草地为5种,放牧草地仅为1种;一二年生植物在三种利用方式下物种数一致,均为4种(表3)。

围封下,寸草(*Carex duriuscula*)的重要值最高,其次是羊草(*Leymus chinensis*)和星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*),除此之外,糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)等禾草的重要值均处于较高水平;刈割下,羊草(*Leymus chinensis*)的重要值最高,其次是寸草(*Carex duriuscula*);放牧下,星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)的重要值最高,其次是寸草(*Carex duriuscula*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)。三种利用方式下,围封下,贝加尔针茅

表3 温性草甸草原不同利用方式下功能群多样性特征

Table 3 Characteristics of functional group diversity in temperate meadow steppe under different utilization methods

植物功能群多样性 Plant functional group diversity	围封 Enclosure	刈割 Mowing	放牧 Grazing
多年生丛生禾草 Perennial bunch grass	8	6	5
多年生根茎禾草 Perennial rhizome grass	5	4	4
多年生杂类草 Perennial forb	38	51	21
灌木和半灌木 Shrub and subshrub	8	5	1
一二年生植物 Annual and biennial plant	4	4	4
总计 Total	63	70	35

(*Stipa baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)等禾草的重要值均高于刈割和放牧;而放牧下,糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和冰草(*Agropyron cristatum*)等禾草的重要值高于围封和刈割(表4)。

表4 温性草甸草原不同利用方式下主要物种的重要值

Table 4 The importance values of the main species in temperate meadow steppe under different utilization methods

植物种 Plant species	拉丁名 Latin name	重要值 Importance value		
		围封 Enclosure	刈割 Mowing	放牧 Grazing
贝加尔针茅	<i>Stipa baicalensis</i>	0.086±0.011	0.067±0.011	0.067±0.013
羊草	<i>Leymus chinensis</i>	0.146±0.030	0.121±0.010	0.116±0.015
洽草	<i>Koeleria macrantha</i>	0.071±0.019	0.015±0.001	0.050±0.008
冰草	<i>Agropyron cristatum</i>	0.032±0.006	0.076±0.044	0.102±0.000
糙隐子草	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	0.096±0.017	0.060±0.018	0.205±0.050
草地早熟禾	<i>Poa pratensis</i>	0.074±0.014	0.036±0.006	0.091±0.000
西伯利亚羽茅	<i>Stipa silisia</i>	0.043±0.016	0.039±0.005	\
巨序翦股颖	<i>Agrostis gigantea</i>	\	\	0.132±0.065
寸草	<i>Carex duriuscula</i>	0.168±0.020	0.107±0.020	0.271±0.022
冷蒿	<i>Artemisia frigida</i>	0.058±0.012	0.031±0.008	0.118±0.049
麻花头	<i>Klasea centauroides</i>	0.046±0.008	0.028±0.003	\
阿尔泰狗娃花	<i>Aster altaicus</i>	0.071±0.018	0.024±0.004	\
蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	0.017±0.005	0.006±0.000	0.093±0.029
星毛委陵菜	<i>Potentilla acaulis</i>	0.119±0.042	0.042±0.020	0.335±0.052
鹅绒委陵菜	<i>Argentina anserina</i>	\	\	0.191±0.045
红柴胡	<i>Bupleurum bicaule</i>	0.034±0.006	0.032±0.002	\
矮韭	<i>Allium anisopodium</i>	0.027±0.004	0.022±0.002	0.052±0.009
蓬子菜	<i>Galium verum</i>	0.027±0.004	0.032±0.006	\
展枝唐松草	<i>Thalictrum squarrosom</i>	0.028±0.008	0.034±0.006	\
花苜蓿	<i>Medicago ruthenica</i>	0.028±0.003	0.035±0.005	0.021±0.000

2.2 不同利用方式对温性草甸草原植物多样性的影响

不同利用方式对植物多样性产生了极显著的影响($P<0.001$),所有多样性指标均一致表现为刈割>围封>放牧的规律(图2,图3)。具体而言,植物物种数(S)从放牧地的3~13种,增至围封地的9~22种,并在刈割地达到最高的19~29种。

Margalef 丰富度指数、Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数在三种方式间均存在显著差异($P<0.05$;图3a-c),其数值范围也依次递减,3个多样性指数的变化范围分别为0.65~4.74,0.70~0.93,1.24~2.96。然而,Pielou 均匀度指数仅在刈割地(0.79~0.90)与放牧地(0.72~0.94)间差异显著,围封样地则与二者均无显著差异(图3d)。

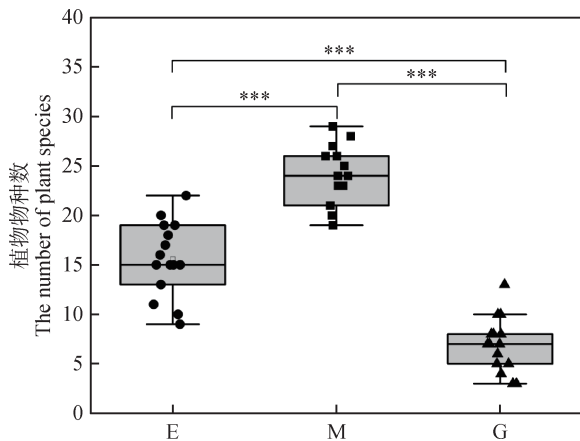


图2 温性草甸草原不同利用方式下植物物种数特征

Fig. 2 The characteristics of plant species numbers in temperate meadow steppe under different utilization methods

注: E为围封, M为刈割, G为放牧; ***表示 $P < 0.001$

Note: E stands for Enclosure, M stands for Mowing, and G stands for Grazing; *** $P < 0.001$

2.3 不同利用方式对温性草甸草原土壤磷含量及其活化系数的影响

不同利用方式显著影响了温性草甸草原的土壤磷含量及有效性。具体而言: 研究区草地 TP 含量变化范围在 $151.25 \sim 269.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 刈割草地的 TP 含量显著高于放牧与围封草地 ($P < 0.05$), 而两者之间无显著差异 (图 4a)。放牧草地的 AP 含

量最高 ($31.67 \sim 77.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 显著高于刈割与围封草地 ($P < 0.05$), 刈割草地的含量 ($32.23 \sim 62.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 次之, 显著高于围封草地 ($P < 0.05$; 图 4b)。放牧草地的 PAC 值 ($21.76\% \sim 47.45\%$) 同样最高, 且与刈割和围封差异显著 ($P < 0.05$), 分别比刈割和围封草地高出 16.12% 与 16.31% ; 而刈割与围封草地之间的 PAC 无显著差异 (图 4c)。

2.4 温性草甸草原不同利用方式下表层土壤 TP, AP, PAC 与植物多样性的关系

在不同利用方式下, 温性草甸草原表层土壤磷指标 (TP, AP, PAC) 与植物多样性指数间的相关关系呈现出显著差异, 具体表现为: 围封条件下, 土壤磷状况对植物多样性的影响最为显著。其中, AP 含量与多项多样性指数关系密切, 与 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数及 Pielou 均匀度指数均呈显著负相关 ($P < 0.05$)。Margalef 丰富度指数不仅与 AP 呈显著负相关, 也与 PAC 呈显著负相关。然而, TP 与所有多样性指数均相关性不显著。刈割条件下, 土壤磷指标与植物多样性之间的关系最为简单, 各项磷指标与植物多样性指数均无显著相关关系。放牧条件下, 相关关系的模式发生改变。TP 含量与 Margalef 丰富

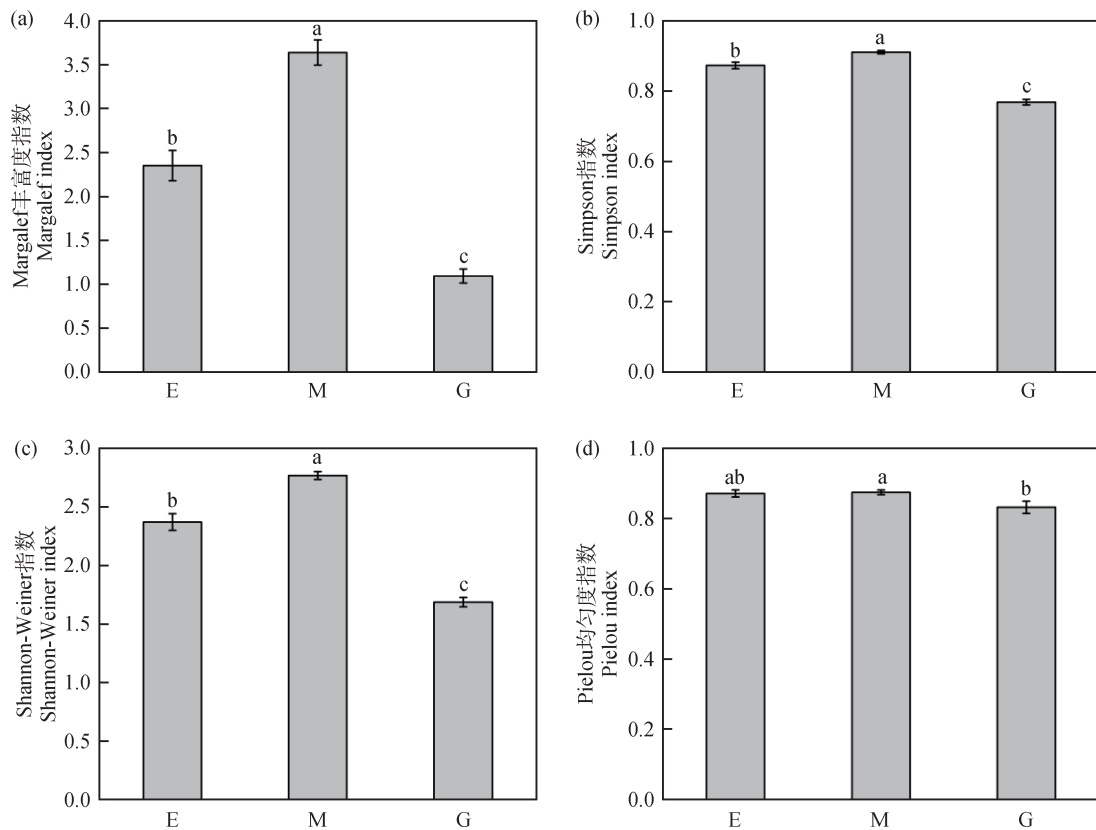


图3 温性草甸草原不同利用方式下植物多样性特征

Fig. 3 Plant diversity characteristics of temperate meadow steppe under different utilization methods

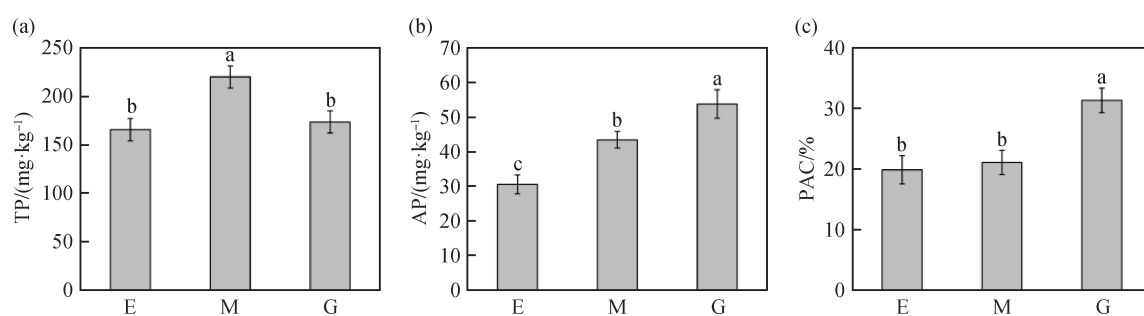


图4 温性草甸草原不同利用方式下土壤磷活化系数特征

Fig. 4 Characteristics of soil P activation coefficient in temperate meadow steppe under different utilization methods

度指数呈显著负相关,而与Pielou均匀度指数呈显著正相关($P<0.05$)。此外,AP与Margalef丰富度指数

呈显著负相关($P<0.05$)。在此方式下,PAC与所有多样性指数均相关性不显著(图5)。

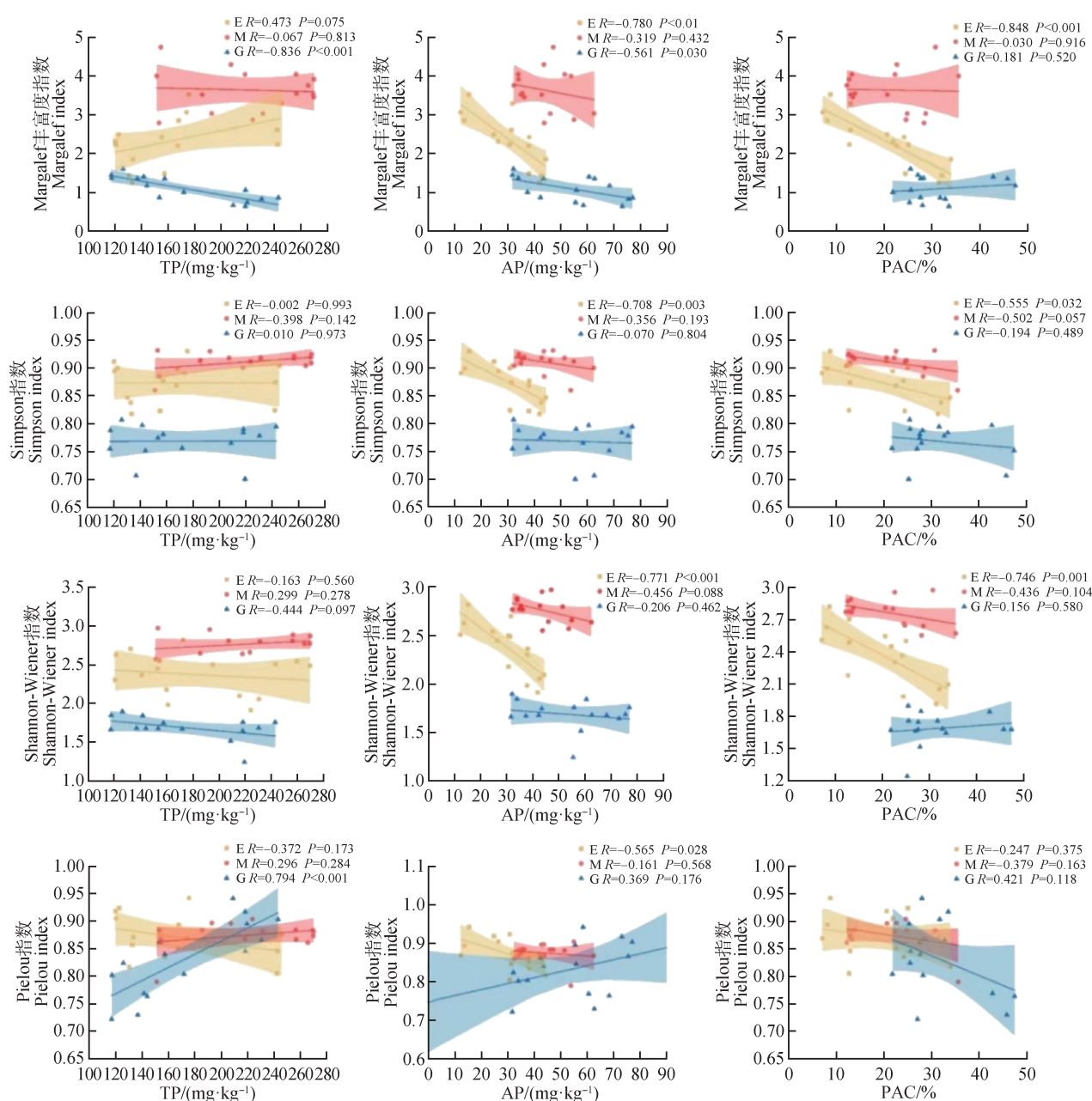


图5 温性草甸草原土壤TP、AP和PAC与植物多样性指数的关系

Fig. 5 The Relationship between Soil TP, AP, and PAC and Plant Diversity Index in temperate meadow steppe

3 讨论

3.1 不同利用方式对温性草甸草原植物多样性的影响

植物多样性是判断生态系统稳定性的指标之一,在草地生态系统中,植物多样性增加有利于缓冲环境对生态系统的不利影响,同时也能对环境变化做出响应^[25]。本研究发现,温性草甸草原植物物种数刈割显著高于围封和放牧,围封显著高于放牧,刈割加剧了杂类草物种的增加,而围封长期不利用增加了灌木和半灌木以及多年生禾草的物种数,这是由于灌木生长较缓慢,禾草适口性好,因此刈割和放牧采食并不适于灌木和半灌木的长期生长以及多年生禾草的稳定发展^[10-11]。Margalef丰富度指数、Simpson指数、Shannon-Wiener指数均呈现出刈割显著高于围封和放牧,而围封显著高于放牧,Pielou指数则表现为刈割显著高于放牧,这说明一年一次的刈割在三种利用方式中最有利于植物多样性的提高^[26];刈割作为一种适度干扰,其促进植物多样性的机制主要体现在两方面:一是通过移除地上植物覆盖改善了地表的光照条件,为更多物种的定殖与生长创造了空间^[15, 27];二是刈割后的休憩期减少了持续人为干扰,为植物恢复提供了必要的时间窗口^[13, 28]。相比之下,长期围封虽排除了放牧破坏,但大量累积的枯落物会抑制多数植物的更新生长,并加剧植物对光、养等资源的竞争^[29-30]。尤其值得注意的是,围封有利于多年生禾草的优势建立,而禾草强大的竞争能力会进一步抑制杂类草的生长,从而导致多样性低于刈割草地^[11]。然而,在应对过度放牧导致的草地退化时,围封通过消除牲畜的采食、践踏等直接破坏,依然是恢复植被和提升多样性的有效途径^[30-32],但其效果受围封年限的显著影响,过长反而可能不利于多样性的持续增加^[33]。放牧通过直接的采食和践踏急剧降低植物多样性,如果放牧持续年限久且不加以控制,则可能引发草地退化并促使草甸草原逆向演替为典型草原^[7, 8, 10, 34-35]。综上,不同利用方式通过改变生物与非生物环境,共同塑造了温性草甸草原的植物多样性格局。

3.2 不同利用方式对温性草甸草原土壤磷活化系数的影响

不同利用方式通过改变植物-土壤系统的物质

循环,显著影响温性草甸草原表层土壤的PAC,该系数由TP与AP共同决定^[36]。本研究发现,放牧利用下的PAC显著高于刈割与围封,这实质上是利用方式分别调控TP和AP后产生的综合结果。首先,三种利用方式对TP库的差异化积累为PAC的变化奠定了基础。刈割利用下的TP含量最高,这得益于其适度的定期干扰维持了磷在植物与土壤间的良性循环,有利于土壤磷的保存^[15]。相反,放牧利用因家畜采食移走磷素和可能的水土流失导致TP减少^[37-38],而常年围封下,多年生禾草和灌木种类会比刈割和放牧地有所增加,磷素被长期禁锢在多年生植物体中,致使土壤TP库维持在相对较低的水平^[29]。本研究发现三种利用方式中,放牧利用下AP含量显著高于围封和刈割,这主要归因于:家畜的粪尿排泄直接归还了易利用的磷形态;同时,家畜的踩踏使土壤容重变高,在一定程度上限制了植物根系对土壤有效磷的吸收,从而使表层土壤有效磷积累^[39];此外,家畜采食降低了植物地下生物量,而植物为了更好地吸收磷等养分,增加了有机酸等根系分泌物的释放,进而促进了微生物对磷的矿化作用,增加了表层土壤的有效磷含量^[38, 40]。刈割适度干扰,植物对有效磷的吸收平衡,因此有效磷含量介于放牧和围封之间;围封草地由于长期未受到干扰,地下微生物活性降低,枯草无法得到分解,并且围封利用使地下根系增多,根系吸收大量土壤中的有效磷,致使有效磷含量低于刈割和放牧利用^[41]。最终,PAC的高低取决于AP与TP的相对比例。放牧利用下,尽管TP库较低,但强烈的生物扰动极大地提升了磷的活化效率(即AP/TP),从而形成最高的PAC。这体现了生态系统通过提高磷素有效性来响应放牧干扰的适应策略^[40, 42]。因此,适度干扰(如刈割)有助于维持磷循环的平衡,而放牧虽能短期提升磷有效性,但其对TP库的消耗可能隐含长期风险。

3.3 温性草甸草原不同利用方式下土壤磷活化系数与植物多样性的关系

本研究揭示了温性草甸草原中,土壤PAC与植物多样性的关系并非固定不变,而是深刻依赖于不同的草地利用方式^[43]。这种关系从围封条件下的显著负相关,转变为刈割与放牧条件下的不显著,表明人为干扰是影响磷有效性与植物多样性之间关系的关键因素。在排除外界干扰的围封状态下,

PAC与Margalef丰富度指数、Simpson指数和Shannon-Wiener指数均呈现显著负相关。其核心机制在于,围封导致生态系统向内部稳定的“顶级群落”演变,多年生禾草和灌木占比增加,磷素被大量积累在植物体和难以分解的枯落物中,土壤磷循环速率减慢,利用效率降低^[20, 29]。此时,较高的植物多样性意味着对有限有效磷资源的竞争更加激烈,从而表现为植物多样性越高,土壤磷的活化系数(PAC)反而越低的负相关格局^[44]。

然而,刈割与放牧这两种干扰方式打破了围封状态下建立的平衡。刈割作为一种中度干预,通过定期移除生物量,促进了磷在土壤-植物系统中的循环与再分配,避免了磷在枯落物中的长期固持^[45]。放牧则通过更强烈的途径改变这一关系:一方面,家畜的采食和践踏直接降低植物丰富度,其粪尿返还虽可能提升土壤有效磷,但同时也会导致水土流失和全磷的损失^[23, 46];另一方面,植物为应对采食胁迫而增加的根系分泌物可能刺激微生物活化磷素^[40]。这些复杂的干扰效应使得磷的输入、输出和转化过程改变,PAC不再与植物多样性保持简单的线性关系,导致二者在刈割和放牧下的相关性消失^[45]。值得注意的是,在放牧条件下,TP与丰富度指数(负相关)和均匀度指数(正相关)的特定关系,进一步印证了强干扰下养分供需平衡被打破后所呈现的复杂反馈^[46]。综上所述,利用方式通过调控土壤磷循环速率和植物群落结构,最终决定了PAC与植物多样性之间关系的强度与方向。这一关系背后可能还涉及复杂的微生物与植物根系反馈过程,这将是未来研究需要深入揭示的机制。

4 结论

本研究表明,温性草甸草原的利用方式显著调控着植物多样性与土壤磷素(全磷、有效磷及磷活化系数)的相互关系。三种利用方式中,一年一次的刈割利用最能促进植物多样性,其土壤全磷含量也最高;放牧利用则显著提升了土壤有效磷含量及土壤磷活化系数,但降低了植物多样性。尤为关键的是,利用方式决定了土壤磷活化系数与植物多样性的相关关系:在围封状态下,二者呈显著负相关;而一年一次的刈割与放牧的人为干扰则打破了这一稳定关系。并且,土壤磷活化系数可作为揭示不同利用方式下草地生态系统状态变化的关键指标,

后续研究将深入解析其内在机理,以期为温性草甸草原的科学管理与保护提供理论依据。

参考文献

- [1] 朱晓昱,徐大伟,辛晓平,等. 1992—2015年呼伦贝尔草原区不同草地类型分布时空变化遥感分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2715-2727
ZHU X Y, XU D W, XIN X P, et al. The spatial-temporal distribution of different grassland types in Hulunber grassland based on remote sensing from 1992 to 2015[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(13): 2715-2727
- [2] 杨殿林. 呼伦贝尔草原群落植物多样性与生产力关系的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2005: 1-11
YANG D L. Relationship between productivity and species diversity of plant community in hulunber grassland [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2005: 1-11
- [3] 倩娜,贾子金,那木汗,等. 呼伦贝尔草原植物资源现状调查研究[J]. 大连民族大学学报, 2023, 25(5): 389-394
QIAN N, JIA Z J, NA M H, et al. Investigation and analysis on the status of grassland plant resources in Hulunbuir[J]. Journal of Dalian Minzu University, 2023, 25(5): 389-394
- [4] 周雨静,贺晶,王雪松,等. 呼伦贝尔草原不同利用方式下土壤盐分分布特征[J]. 草地学报, 2024, 32(2): 470-479
ZHOU Y J, HE J, WANG X S, et al. Distribution characteristics of soil salinity under different utilization patterns in Hulunbuir grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(2): 470-479
- [5] 张志莉. 呼伦贝尔草原草地退化的影响因素的统计分析[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2020, 51(6): 608-614
ZHANG Z L. Statistical analysis of factors affecting grassland degradation in Hulunbuir grassland[J]. Journal of Inner Mongolia University(Natural Science Edition), 2020, 51(6): 608-614
- [6] 朱媛君. 呼伦贝尔草原生物多样性-生态系统功能关系及其对利用方式的响应[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2021: 147-161
ZHU Y J. Grassland plant diversity-ecosystem function relationship and its response to management regimes in Hulunbuir[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2021: 147-161
- [7] 徐大伟. 呼伦贝尔草原区不同草地类型分布变化及分析[D]. 北京:中国农业科学院, 2019: 1-9
XU D W. Dynamic change and analysis of different grassland types distribution in the Hulunber grassland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019: 1-9
- [8] 文都日乐. 呼伦贝尔主要草地类型植被特征、土壤特性与微生物多样性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011: 87-91
WEN D R L. Study on vegetation characteristics, soil properties and microbial diversity of main grassland types in Hulunbeier [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011: 87-91
- [9] 赵星宇,韩国强,张圣微,等. 放牧对不同草原植物多样性及其碳储量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5395-5405

- ZHAO X Y, HAN G Q, ZHANG S W, et al. Effects of grazing on plant diversity and their carbon stocks in different types of grasslands[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(9): 5395-5405
- [10] 闫瑞瑞, 张宇, 辛晓平, 等. 刈割干扰对羊草草甸草原植物功能群及多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2573-2583
- YAN R R, ZHANG Y, XIN X P, et al. Effects of mowing disturbance on grassland plant functional groups and diversity in *Leymus chinensis* meadow steppe [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2573-2583
- [11] 聂莹莹, 辛晓平, 徐丽君, 等. 封育措施对呼伦贝尔草甸草原区草地生产力的影响[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(8): 74-82
- NIE Y Y, XIN X P, XU L J, et al. Effects of enclosure measures on grassland and productivity in Hulunbeier meadow steppe [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(8): 74-82
- [12] 孙崇之, 唐士明, 王珍, 等. 温带草原围封对植物群落的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(5): 1481-1489
- SUN C Z, TANG S M, WANG Z, et al. Effects of the enclosure on plant communities in temperate grassland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(5): 1481-1489
- [13] YANG G J, LÜ X T, STEVENS C J, et al. Mowing mitigates the negative impacts of N addition on plant species diversity[J]. *OECOLOGIA*, 2019, 189(3): 769-779
- [14] 王静宜, 田彦军, 张璞进, 等. 不同利用方式对鄂尔多斯荒漠草原植被群落与土壤特性的影响[J]. *当代畜禽养殖业*, 2024, 44(1): 8-12
- WANG J Y, TIAN Y J, ZHANG P J, et al. Effects of different utilization methods on vegetation community and soil characteristics in Erdos desert steppe[J]. *Modern Animal Husbandry*, 2024, 44(1): 8-12
- [15] 郑佳华. 利用方式对大针茅草原生物多样性和生态系统多功能性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021: 4-40
- ZHENG J H. The effects of different management regimes on the biodiversity and ecosystem multifunctionality of *Stipa grandis* steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021: 4-40
- [16] 萨仁其力莫格, 荆佳强, 秦洁, 等. 不同利用方式下贝加尔针茅草原植物和土壤的生态化学计量特征[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(1): 20-29
- SA R Q L M, JING J Q, QIN J, et al. Ecological stoichiometric characteristics of plants and soil in *stipa baicalensis* grassland under different utilization modes[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(1): 20-29
- [17] 张梅. 放牧和刈割对内蒙古草原土壤磷库和磷转化相关功能菌群的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022: 21-77
- ZHANG M. The effects of grazing and mowing on soil phosphorus pools and microbes related to phosphorus transformation in Inner Mongolia grassland [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022: 21-77
- [18] 关伟涛, 郑志荣, 刁兆岩, 等. 不同干扰方式下温性草甸草原土壤碳氮磷化学计量特征及其储量研究[J]. *草地学报*, 2022, 30(11): 2959-2966
- GUAN W T, ZHENG Z R, DIAO Z Y, et al. Stoichiometric characteristics and their storage of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the temperate meadow steppe under different disturbances[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 2959-2966
- [19] 秦丽萍, 罗天旭, 冯兆林, 等. 不同利用方式天然草原土壤肥力研究[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(10): 46-49
- QIN L P, LUO T X, FENG Z L, et al. Study on soil fertility of natural grassland under different utilization modes [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(10): 46-49
- [20] 姚喜喜, 才华, 李长慧. 封育和放牧对高寒草甸植被群落特征和土壤特性的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(S1): 128-136
- YAO X X, CAI H, LI C H. Effects of fencing and grazing on vegetation community characteristics and soil properties in an alpine meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(S1): 128-136
- [21] 李静鹏, 郑志荣, 赵念席, 等. 刈割、围封、放牧三种利用方式下草原生态系统的多功能性与植物物种多样性之间的关系[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(8): 735-747
- LI J P, ZHENG Z R, ZHAO N X, et al. Relationship between ecosystem multifunctionality and species diversity in grassland ecosystems under land-use types of clipping, enclosure and grazing [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(8): 735-747
- [22] WU Q H, ZHANG S X, ZHU P, et al. Characterizing differences in the phosphorus activation coefficient of three typical cropland soils and the influencing factors under long-term fertilization[J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e0176437
- [23] 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
- [24] GAO Y, AN Y, QI B L, et al. Grazing exclusion mediates the trade-off between plant diversity and productivity in *Leymus chinensis* meadows along a chronosequence on the Songnen Plain, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107655
- [25] CUI Z, SUN J, WU G L. Plant diversity increases spatial stability of aboveground productivity in alpine grasslands [J]. *OECOLOGIA*, 2024, 205(1): 27-38
- [26] 罗天相, 刘莎. 中度放牧干扰对草地生物多样性影响的思考[J]. *安徽农业科学*, 2007(21): 6567-6568
- LUO T X, LIU S. Influence of the intermediate grazing disturbance on the biodiversity of grassland ecosystem [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007(21): 6567-6568
- [27] 高韶勃, 刘磊, 王宇坤, 等. 不同利用方式下内蒙古典型草原群落物种相互关系的年际变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6562-6570
- GAO S B, LIU L, WANG Y K, et al. The annual variation of effects under different grassland utilization types on typical

- steppe species interactions in Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6562-6570
- [28] 张泽, 孙贺阳, 郑云暖, 等. 不同利用方式对内蒙古典型草原主要群系生态用水的影响[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(4): 1-10
- ZHANG Z, SUN H Y, ZHENG Y N, et al. Effects of different utilization methods on ecological water use of major plant communities of typical grassland in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(4): 1-10
- [29] 李佳秀, 张青松, 吴勇, 等. 围封对草地植被生长和土壤特性的影响研究进展[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(5): 137-150
- LI J X, ZHANG Q S, WU Y, et al. Research progress on the effects of enclosure on grassland vegetation growth and soil properties [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(5): 137-150
- [30] 贺聪. 围封年限对高寒草甸植物功能性状、多样性和生产力的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2023: 21-52
- HE C. Effects of grazing exclusion duration on plant functional traits, diversity and productivity in an alpine meadow [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023: 21-52
- [31] 杨天成, 李晓佳. 不同草地利用方式对内蒙古典型草原群落特征及草地健康的影响[J]. *草业科学*, 2022, 39(05): 841-849
- YANG T C, LI X J. Effects of land use patterns on community characteristics and grassland health in Inner Mongolia [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(5): 841-849
- [32] 靳三玲, 刁兆岩, 吕世海, 等. 呼伦贝尔草原植物功能群对围封及放牧的响应特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(1): 151-158
- JIN S L, DIAO Z Y, LÜ S H, et al. Response characteristics of plant functional groups to enclosure and grazing in Hulunbuir grassland [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(1): 151-158
- [33] 聂莹莹, 陈金强, 辛晓平, 等. 呼伦贝尔草原草甸区主要植物种群生态位特征与物种多样性对封育年限响应[J]. *草业学报*, 2021, 30(10): 15-25
- NIE Y Y, CHEN J Q, XIN X P, et al. Responses of niche characteristics and species diversity of main plant populations to duration of enclosure in the Hulun Buir meadow steppe [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2021, 30(10): 15-25
- [34] 闫卫民, 张世彬, 杨元武. 放牧强度对高寒草甸物种多样性和生产力关系的影响[J]. *草业科学*, 2024, 41(3): 539-547
- YAN W M, ZHANG S B, YANG Y W. Effects of grazing intensity on the relationship between plant species diversity and primary productivity in an alpine meadow [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2024, 41(3): 539-547
- [35] 刘琼, 席青虎, 乌仁其其格. 不同利用方式对呼伦贝尔草甸草原植物群落特征的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(6): 58-66
- LIU Q, XI Q H, WU R Q Q G. Effects of different utilization modes of plant community characteristics on hulunbuir meadow grassland [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(6): 58-66
- [36] CUI H Y, SUN W, DELGADO-BAQUERIZO M, et al. Phosphorus addition regulates the responses of soil multifunctionality to nitrogen over-fertilization in a temperate grassland [J]. *Plant and Soil*, 2022, 473(1-2): 73-87
- [37] 吴雨晴. 不同利用方式对呼伦贝尔草原生态系统化学计量特征的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020: 14-43
- WU Y Q. Effects of different utilization methods on stoichiometric characteristics in the grassland ecosystem of Hulunbuir [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020: 14-43
- [38] 乌力吉. 放牧对内蒙古典型草原生态系统磷平衡的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020: 90-110
- WU L J. Effects of grazing on phosphorus balance in a typical steppe of Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020: 90-110
- [39] 袁淑雅, 贺晶, 苏德荣. 降水格局变化和放牧对草地土壤磷转化影响的研究进展[J]. *草地学报*, 2024, 32(1): 25-36
- YUAN S Y, HE J, SU D R. Advances in the effects of precipitation pattern change and grazing on soil phosphorus conversion in grassland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 25-36
- [40] WANG M, ZHANG C, CHEN S S, et al. Moderate grazing increased carbon, nitrogen and phosphorus storage in plants and soil in the Eurasian meadow steppe ecosystem [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 914: 169864
- [41] 李浩. 长期围封与放牧对典型草原群落和土壤空间异质性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021: 14-69
- LI H. Effects of long-term enclosure and grazing intensity on spatial heterogeneity of plant diversity and soil nutrient in typical steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021: 14-69
- [42] 万志强, 杨九艳, 谷蕊, 等. 不同刈割频率对大针茅草原群落特征及土壤元素含量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(17): 5477-5484
- WAN Z Q, YANG J Y, GU R, et al. Effects of different mowing frequency on the community characteristics and soil element contents in a *Stipa grandis* steppe ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5477-5484
- [43] 乌力吉, 李响, 赵萌莉, 等. 放牧对草地生态系统磷循环调控机制的研究进展与展望[J]. *科学通报*, 2020, 65(23): 2469-2482
- WU L J, LI X, ZHAO M L, et al. Grazing regulation of phosphorus cycling in grassland ecosystems: Advances and prospects [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(23): 2469-2482
- [44] LI J P, ZHENG Z R, XIE H T, et al. Increased soil nutrition and decreased light intensity drive species loss after eight years grassland enclosures [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 44525
- [45] ZHANG C P, LI Q, FENG R Q, et al. Ecosystem compartment stoichiometry drives the secondary succession processes of zokor-disturbed grassland [J]. *European Journal of Soil Science*, 2024, 75(5): e70000
- [46] 颜熙. 短期氮磷施肥和冷季放牧对高寒草甸植物多样性与生产力的影响及机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021: 28-60
- YAN X. Mechanisms and interaction effects of short-term nitrogen and phosphorus fertilization and cold-season grazing on plant diversity and productivity of alpine meadow [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021: 28-60