



氮肥添加对内蒙古温带草甸草原牧草营养品质与群落结构的影响

陈翔 王召明 张晓严 胡努斯吐 张健 张春良 任海燕 宋晓辉

Effects of nitrogen fertilizer addition on forage nutrition quality and community structure in temperate meadow steppe of Inner Mongolia

CHEN Xiang, WANG Zhaoming, ZHANG Xiaoyan, Hunusitu, ZHANG Jian, ZHANG Chunliang, REN Haiyan, SONG Xiaohui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

青藏高原不同类型高寒草地物种多样性与生物量的关系及影响要素

Correlations of species diversity and biomass with environmental factors in alpine grasslands across the Qingzang Plateau

草业科学. 2023, 40(3): 616 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0126>

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

Effects of land use patterns on community characteristics and grassland health in Inner Mongolia

草业科学. 2022, 39(5): 841 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0459>

优势物种对内蒙古典型草原营养物质生产的决定性影响

Dominant species determined forage quantity and quality in a typical Inner Mongolia steppe

草业科学. 2024, 41(9): 2012 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0375>

黄河上游白河干流全段植物群落特征及生物多样性

Research on plant community characteristics and biodiversity in the whole section of the main stream of Baihe River in the upper reaches of the Yellow River

草业科学. 2023, 40(4): 848 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0303>

松嫩草甸草原植物群落物种组成和多样性对刈割和长期放牧的响应

Responses of plant communities, species composition, and diversity to mowing and long-term grazing in the Songnen meadow steppe

草业科学. 2024, 41(2): 271 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0771>

高寒草甸植物始花期物候和生物量分配对氮添加的响应

Response of plant first flowering and biomass allocation to nitrogen addition in an alpine meadow

草业科学. 2023, 40(4): 916 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0216>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0007

陈翔, 王召明, 张晓严, 胡努斯吐, 张健, 张春良, 任海燕, 宋晓辉. 氮肥添加对内蒙古温带草甸草原牧草营养品质与群落结构的影响. 草业科学, 2025, 42(3): 743-751.

CHEN X, WANG Z M, ZHANG X Y, Hunusitu, ZHANG J, ZHANG C L, REN H Y, SONG X H. Effects of nitrogen fertilizer addition on forage nutrition quality and community structure in temperate meadow steppe of Inner Mongolia. Pratacultural Science, 2025, 42(3): 743-751.

氮肥添加对内蒙古温带草甸草原牧草营养品质与群落结构的影响

陈翔^{1,2}, 王召明², 张晓严^{1,2}, 胡努斯吐^{1,2}, 张健^{1,2},
张春良^{1,2}, 任海燕³, 宋晓辉^{1,2,3}

(1. 蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 内蒙古呼和浩特 010070; 2. 国家草业技术创新中心(筹), 内蒙古呼和浩特 010060; 3. 内蒙古农业大学草业学院, 内蒙古呼和浩特 010018)

摘要: 为研究不同施肥量和施肥方式对内蒙古温带草甸草原牧草营养品质和植物群落结构的影响, 设计 2 种氮肥添加方式(撒施和条施)、5 个不同施肥量(0、6、12、20 和 32 g·m⁻²), 于 2019–2021 年每年 8 月中旬测定群落高度、盖度、密度和生物量, 计算多样性指数, 测定中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维和粗蛋白含量, 并计算相对饲用价值。结果表明: 不同氮肥施肥方式对中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、粗蛋白含量和相对饲用价值等指标均未产生显著影响($P > 0.05$); 氮肥添加显著降低了中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量, 显著提高了粗蛋白含量和相对饲用价值($P < 0.05$); 随着年份的推移, 均匀度指数、优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均呈现显著降低的趋势, 可食性牧草占比逐年增加。研究结果揭示了在内蒙古温带草甸草原施加氮肥可提高牧草饲用品质。

关键词: 撒施; 条施; 相对饲用价值; 多样性指数; 生物量; 群落结构

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2025)03-0743-09

Effects of nitrogen fertilizer addition on forage nutrition quality and community structure in temperate meadow steppe of Inner Mongolia

CHEN Xiang^{1,2}, WANG Zhaoming², ZHANG Xiaoyan^{1,2}, Hunusitu^{1,2}, ZHANG Jian^{1,2},
ZHANG Chunliang^{1,2}, REN Haiyan³, SONG Xiaohui^{1,2,3}

(1. M-Grass Ecology And Environment (Group) Co., Ltd., Huhhot 010070, Inner Mongolia, China;
2. National Center of Pratacultural Technology Innovation (under preparation), Huhhot 010060, Inner Mongolia, China;
3. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: To study the effects of different fertilizer rate and fertilizer methods on forage nutrition quality and plant community structure in temperate meadow steppe of Inner Mongolia, we designed two nitrogen addition methods with scattering application and row application and five different fertilization amounts (0, 6, 12, 20 and 32 g·m⁻²). We measured community height, cover, density, and biomass, and calculated the diversity index. Meanwhile, we determined the neutral detergent fiber, acidic detergent fiber, and crude protein contents in mid-August from 2019 to 2021 and calculated the

收稿日期: 2024-01-08 接受日期: 2024-09-24

基金项目: 国家草业技术创新中心(筹)项目(CCPTZX2023B02); “十四五”国家重点研发计划项目(2023YFF1304100); 国家重点研发计划项目(2022YFF1302300); 内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划项目(NMGIRT2403)

第一作者: 陈翔(1988-), 男, 内蒙古包头人, 副高级园林工程师, 博士, 研究方向为草原生态修复。E-mail: 531740713@qq.com

通信作者: 宋晓辉(1995-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 中级林业工程师, 在读博士生, 研究方向为草原生态修复。E-mail: 935227789@qq.com

relative feeding value. The results showed that different fertilization additions had no significant effects on neutral detergent fiber, acid detergent fiber, crude protein, and relative feeding value ($P > 0.05$). Nitrogen fertilizer addition significantly decreased neutral and acidic detergent fiber but significantly increased crude protein content and relative feeding value ($P < 0.05$). With the accumulation of years, the evenness index, dominance index, and Shannon-Wiener index all showed a significant decreasing trend ($P < 0.05$). The proportion of edible forage increased. This study has shown that nitrogen fertilizer addition can improve forage quality in Inner Mongolia temperature meadow steppe.

Keywords: scattering application; row application; relative feeding value; diversity index; biomass; community structure

Corresponding author: SONG Xiaohui E-mail: 935227789@qq.com

我国国土面积辽阔,拥有丰富的植物资源和植被类型。草地作为陆地生态系统的重要组成部分,其植被类型分布广泛,占国土面积的 40% 左右^[1],在涵养水源、防风固沙、固碳释氧、维持生态平衡等方面发挥着举足轻重的作用^[2]。内蒙古草原不仅分布范围广、代表性强^[3],也是我国北方生态安全屏障的重要组成部分;其面积约占全国草原总面积的 22%,自东向西依次分布着温性草甸草原、温性典型草原、温性荒漠草原、温性草原化荒漠和温性荒漠类五大草原类型。然而随着社会的发展,全球气候变化、人类不合理利用草地等因素使得草原发生严重退化^[4],导致草原土壤贫瘠、病害鼠害频繁出现、原有群落优势物种生物量下降、牧草综合营养价值降低等^[5]。施肥作为草原生态恢复重要手段之一,在促进牧草生长、增加土壤养分的同时,还可以改变种群结构,提高牧草产量和饲用价值^[6-7]。有研究表明,施加氮肥和磷肥可以在土壤磷酸酶的作用下,快速将土壤有机态氮和磷转化为可被植物直接吸收利用的无机态氮和磷,促进植物的生长发育^[8]。

随着全球气候变化的加剧,氮元素对草地生态系统的影响也日益加剧^[9],草地生产力对氮添加的响应会受到环境因素、草地类型和利用方式等因素的影响差异而有所不同。在内蒙古草原,氮素被认为是影响陆地生态系统生产力最重要的限制因素之一^[10];同时,氮素也是决定植物生长的关键因子^[11],氮肥可以促进禾本科牧草生长,降低杂类草在种群中占比,进而影响草原区牧草的数量和质量^[12]。在大面积天然退化草地补播修复中,通常使用免耕补播机以播种+条状施肥或免耕补播+抛肥机抛撒肥料等方式进行,但是撒施和条施对退化草地修复后植被、土壤等方面恢复效果的研究还相对匮乏。因此,本研究通过比较两种施肥方式对内蒙古退化草

甸草原的修复效果,分析氮素添加后群落结构的变化,以期为今后退化草原施肥修复提供可行性路径。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古锡林郭勒盟乌拉盖管理区(45°59'26"~45°59'29"N, 119°11'46"~119°11'51" E, 海拔 920 m),属于温带大陆性气候,土壤类型为栗钙土。主要建群种为羊草(*Leymus chinensis*),其伴生种有短花针茅(*Stipa breviflora*)、羽茅(*Achnatherum extremiorientale*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)等。年平均降水量在 350 mm 左右,主要集中在 5 月—8 月。2019—2021 年试验地年平均气温 1.87 °C,年均降水量 355 mm。2019 年月降水量最多在 8 月(97.6 mm),最低在 1 月(0.2 mm);2020 年月降水量最多在 6 月(117.6 mm),最低在 12 月(0.7 mm);2021 年月降水量最多在 7 月(95.5 mm),最低在 10 月(0.1 mm)。2019—2021 年生长季(5 月—10 月)分别占 2019 年、2020 年和 2021 年全年降水量的 94.08%、88.72% 和 88.01% (图 1)。

1.2 试验设计

试验采用双因素随机区组设计,设置条施和撒施两种施肥方式,分别模拟草原退化草地修复使用免耕机和撒施机施肥。撒施是以人工抛撒的方式均匀撒到对应小区内,条施是用铁锹人工开沟,开沟间隔 20 cm,深度 2~3 cm,将氮肥施入沟中后覆土。分为 5 个不同施肥量(0、6、12、20 和 32 g·m⁻²,分别用 CK、N₁、N₂、N₃、N₄ 表示),每个处理 5 次重复,共计 50 个试验小区(图 2)。氮素添加纯度 > 99% 的硝酸铵钙,2019 年 6 月一次性氮添加处理,以后每年在 6 月初下雨之前一次性氮添加处理。

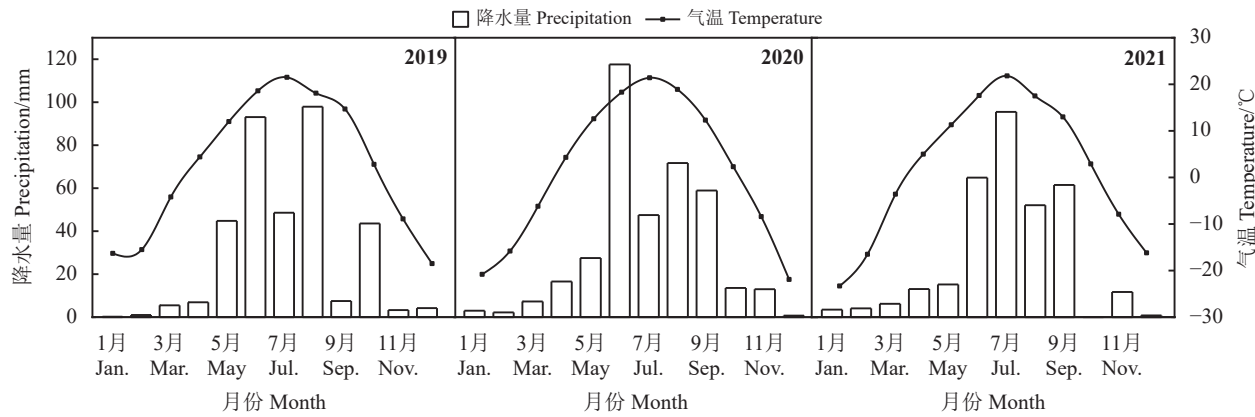


图 1 2019—2021 年降水量与气温

Figure 1 Precipitation and temperature in from 2019 to 2021

	撒施处理 Scattering application					条施处理 Row application				
	5 cm									
	N ₃	CK	N ₄	N ₁	N ₃	CK	N ₄	CK	N ₁	N ₂
	CK	N ₄	N ₁	N ₄	CK	N ₄	N ₃	N ₂	CK	CK
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₂	CK	N ₁	N ₁	N ₄	N ₂	N ₃
	N ₂	N ₃	N ₂	N ₁	N ₃	N ₃	N ₂	N ₃	N ₄	N ₁
	N ₄	N ₁	N ₂	CK	N ₄	N ₂	N ₄	N ₁	N ₃	CK

图 2 试验设计

Figure 2 Experimental design

CK、N₁、N₂、N₃、N₄ 分别表示施肥 0、6、12、20、32 g·m⁻²，下同。

CK, N₁, N₂, N₃, and N₄ indicate fertilizer application of 0, 6, 12, 20, and 32 g·m⁻², respectively. This is applicable for the following figures and tables as well.

1.3 样品采集与分析

2019—2021 年每年生长季旺季 8 月中旬，用 1 m × 1 m 样方监测每个试验小区高度、盖度、密度，并齐地刈割地上植物部分，带回实验室 65 °C 烘干称重计算多样性指数；并且将地上生物量用球磨仪粉碎后过 1 mm 筛，然后分别测定中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维和粗蛋白等指标并计算其相对饲用价值。

粗蛋白用凯氏定氮法测定，中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量分别按照 GB/T 20806—2022 [13] 和 NY/T 1459—2007 [14] 测定。

相对饲用价值 = (DDM × DMI) / 1.29;

DDM = 88.9 - 0.779ADF;

DMI = 120 / NDF。

式中：DDM 表示可消化干物质 (%); ADF 表示牧草酸性洗涤纤维; DMI 表示干物质采食量 (%); NDF 表示牧草中性洗涤纤维。

植物多样性的变化选取 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数以及

Shannon-Wiener 多样性指数进行描述。

Margalef 丰富度指数: $R = (S - 1) / \ln N$;

Pielou 均匀度指数: $E = H / \ln S$;

Simpson 优势度指数: $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$;

Shannon-Wiener 多样性指数: $H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ 。

式中：P_i = n_i/N。n_i 为第 i 个种的个数; N 为总体个数; S 为样地植物种数。

1.4 数据处理

用 Excel 2010 对数据进行整理，用 SAS 9.0 对数据进行方差分析，采用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同年际间牧草营养品质在不同施肥量及施肥方式下的变化

方差分析 (表 1) 发现，不同年际间中性洗涤纤

表 1 不同年份、施肥方式和施肥量对牧草中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、粗蛋白和相对饲用价值的方差分析 (*P* 值)

Table 1 Three-way analysis of different years, fertilization methods, and fertilization amounts on neutral detergent fiber, acidic detergent fiber, crude protein, and relative feed value of forage (*P* value)

变异来源 Source of variation	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acidic detergent fiber	粗蛋白 Crude protein	相对饲用价值 Relative feeding value
年份 Year (Y)	< 0.000 1**	< 0.000 1**	< 0.000 1**	< 0.000 1**
施肥方式 Fertilizer method (Fm)	0.948 2	0.137 0	0.584 0	0.385 6
施肥量 Fertilizer rate (Fr)	0.186 9	0.205 9	< 0.000 1**	0.070 5
Y × Fm	0.600 4	0.042 1*	0.699 4	0.813 8
Y × Fr	0.283 9	0.782 5	0.007 3**	0.385 6
Fm × Fr	0.805 5	0.589 7	0.573 9	0.818 9
Y × Fm × Fr	0.819 8	0.298 8	0.344 1	0.906 7

*和**分别表示在0.05和0.01水平下达到显著水平，表2同。

* and ** indicate significance levels at 0.05 and 0.01 levels. This is applicable for Table 2 as well.

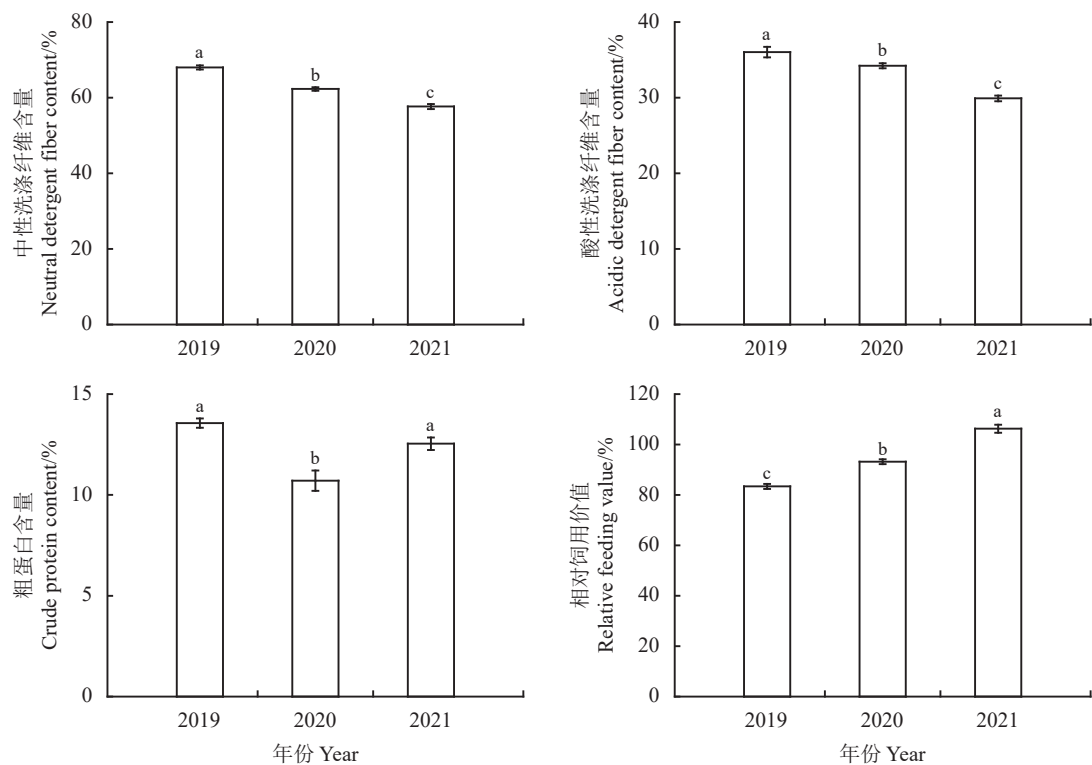


图 3 不同年份对牧草营养成分的单因素方差分析

Figure 3 One-way analysis of variance on forage nutrients in different years

不同小写字母表示不同年份之间差异显著 ($P < 0.05$)，图 5 同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different years at the 0.05 level. This is applicable for Figure 5 as well.

维、酸性洗涤纤维、粗蛋白和相对饲用价值均发生了极显著变化 ($P < 0.01$)；不同施肥量对粗蛋白含量产生了极显著影响 ($P < 0.01$)；不同年份和施肥方式的交互作用对酸性洗涤纤维含量产生了显著影响 ($P < 0.05$)；不同年份和施肥量的交互作用对粗蛋白含量产生了极显著影响 ($P < 0.001$)。

2.2 氮肥添加后不同年际间牧草营养动态变化

如图 3 所示，添加氮肥后，中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量随着施肥年份增加呈现显著降低的趋势 ($P < 0.05$)；粗蛋白含量随着施肥年份的增长呈现先下降后上升的趋势，2020 年粗蛋白含量显著

低于 2019 年和 2021 年,但在 2019 年和 2021 年之间差异不显著 ($P > 0.05$); 相对饲用价值随着施肥年份的增加呈现出显著上升的趋势,2021 年牧草营养的相对饲用价值分别较 2020 年和 2019 年显著增加了 27.46% 和 14.06%。

2.3 不同施肥量对牧草营养成分的影响

施加氮肥后,牧草营养成分与对照相比发生了明显变化,表现为氮肥添加降低了酸性洗涤纤维,却显著 (N_2 处理除外) 提高了粗蛋白含量和相对饲用价值 ($P < 0.05$)。与对照相比,中性洗涤纤维在施肥 N_3 处理下显著降低,与 N_1 、 N_2 、 N_4 处理不存在显著差异 ($P > 0.05$); 酸性洗涤纤维在 N_4 处理下显著降低,与其他 3 个施肥处理也不存在显著差异; 粗蛋白含量在 N_4 处理下显著升高,但在 N_1 和 N_3 处理之间不存在显著性差异; 相对饲用价值 N_3 处理下显著升高,但与其他施肥处理也不存在显著差异 (图 4)。

2.4 不同年际间群落结构在不同施肥量及施肥方式下的变化

方差分析 (表 2) 发现,不同年际对 Margalef 丰

富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均含量产生了极显著影响 ($P < 0.01$); 年份和施肥方式的交互作用对 Simpson 指数产生了显著影响 ($P < 0.05$); Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数在施肥方式和施肥量的交互作用下达到了边缘显著 ($0.05 < P < 0.1$)。

无论是条施还是撒施氮肥,从 2019—2021 年豆科牧草和禾本科牧草所占比例均呈现明显上升的趋势,而一、二年生杂类草所占比例随着年际的变化呈现明显下降的趋势 (表 3)。

2.5 不同年际间植物多样性的变化

2020 年和 2021 年相比 2019 年 Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均显著降低 ($P < 0.05$),而 Margalef 丰富度指数呈先降低后升高的趋势。2021 年 Pielou 指数较 2019 年显著降低了 17.65%; Simpson 指数较 2019 年显著降低了 23.21%; Shannon-Wiener 指数较 2019 年显著降低了 15.11%, Pielou 指数、Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数在 2020 年和 2021 年之间差异不显著 ($P >$

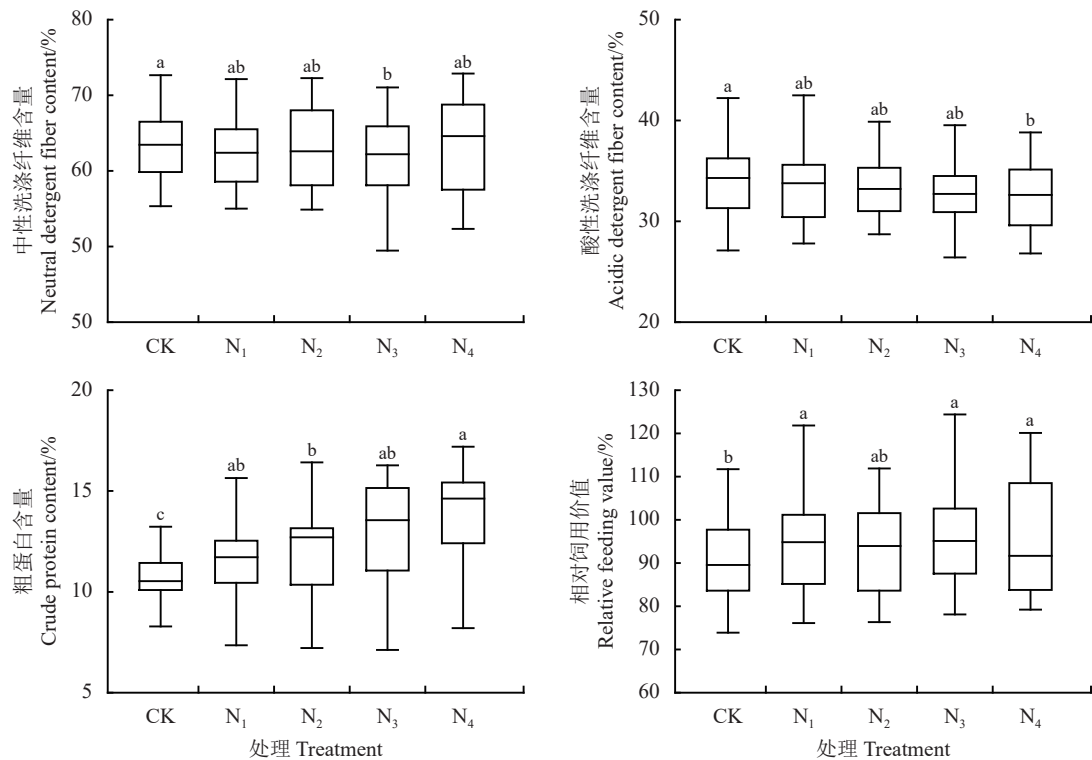


图 4 不同施肥量对牧草营养成分的单因素方差分析

Figure 4 One-way analysis of variance on plant forage nutrients with different fertilization amounts

不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences among different fertilizer treatments at the 0.05 level.

表 2 不同年份、施肥方式和施肥量对植物多样性的三因素方差分析 (*P* 值)
Table 2 Three-factor variance analysis of plant diversity with different years, fertilizer methods, and fertilizer rate (*P* value)

变异来源 Source of variation	Margalef 丰富度指数 Margalef index	Pielou 均匀度指数 Pielou index	Simpson 优势度指数 Simpson index	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener index
年份 Year (Y)	< 0.000 1 ^{**}	< 0.000 1 ^{**}	< 0.000 1 ^{**}	< 0.000 1 ^{**}
施肥方式 Fertilizer method (Fm)	0.386 0	0.311 3	0.147 7	0.259 5
施肥量 Fertilizer rate (Fr)	0.688 0	0.478 0	0.356 5	0.365 1
Y × Fm	0.905 7	0.152 1	0.032 6 [*]	0.134 7
Y × Fr	0.723 6	0.177 0	0.290 4	0.201 0
Fm × Fr	0.113 2	0.223 0	0.055 3	0.052 9
Y × Fm × Fr	0.141 6	0.748 0	0.633 0	0.608 9

表 3 氮肥添加后生物量占比变化
Table 3 Changes in biomass proportion after nitrogen fertilizer addition

科 Family	年份 Year	% 条施 Row application 撒施 Scattering application	
豆科 Leguminosae	2019	3.63	1.86
	2020	3.68	2.73
	2021	7.37	5.03
禾本科 Gramineae	2019	76.41	78.81
	2020	80.55	82.26
	2021	84.12	84.22
杂类草 Forbs	2019	19.96	19.33
	2020	15.77	15.01
	2021	8.51	10.75

0.05)。Margalef 指数在 2021 年较 2019 年、2020 年分别显著提高了 6.48% 和 22.34% (图 5)。

3 讨论

3.1 不同年际间牧草营养动态变化

中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维直接决定放牧家畜的采食量和消化率,中性洗涤纤维含量越高,则牧草适口性越差;酸性洗涤纤维含量越高,放牧家畜采食后不易消化^[15-16]。本研究发现,与对照相比,氮素添加后牧草中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维发生了显著变化,N₃ 和 N₄ 处理下中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维显著降低,这一研究结果与呼伦贝尔草甸草原上^[17]的研究结果一致,说明氮素添加后提高牧草质量,牧草更易被家畜采食和消化。牧草中粗蛋

白含量是放牧家畜所需的必要营养物质,氮素供应较多可有效地增加粗蛋白含量^[18]。本研究中经过 3 年氮素添加后牧草中粗蛋白含量整体上呈现上升的趋势,但 2020 年显著低于 2019 年和 2021 年,原因可能是只对粗蛋白含量进行了单方面的分析,没有考虑不同氮素添加方式、不同施氮量等因素及其交互作用。相对饲用价值用于表示牧草可消化干物质的采食量^[19],相对饲用价值越高,则表示牧草的营养品质就越好^[20],本研究中氮素添加 3 年后牧草相对饲用价值明显提高,这印证了氮素添加后提高了牧草的营养品质。

3.2 不同施肥量对牧草营养品质的影响

牧草中酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维是家畜不易消化的部分。Lutti 等^[21]研究发现随着施氮量的增加,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维呈现极显著降低,且施氮后中性洗涤纤维含量小于 60%,酸性洗涤纤维含量小于 40%。本研究中随着施肥量增加,中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维均呈现显著降低趋势,这一结果与 Lutti^[21]研究结果基本一致,这是因为中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维是构成植物细胞壁的主要成分,施肥可以增加牧草中可溶性糖和氨基酸等营养成分,这些成分的增加促进细胞壁的降解,从而降低了纤维含量;而且中性洗涤纤维在 N₃ (20 g·m⁻²) 处理下显著低于对照,酸性洗涤纤维在 N₄ (32 g·m⁻²) 处理下显著低于对照,这说明中洗洗涤纤维在 N₃ 处理下降到最低,而酸性洗涤纤维不会随着施肥量的增加继续下降仍需进一步研究,粗蛋白含量随施肥量的增加表现出上升趋势是因为增加施氮量可提高牧草叶片光合能力,促进营养

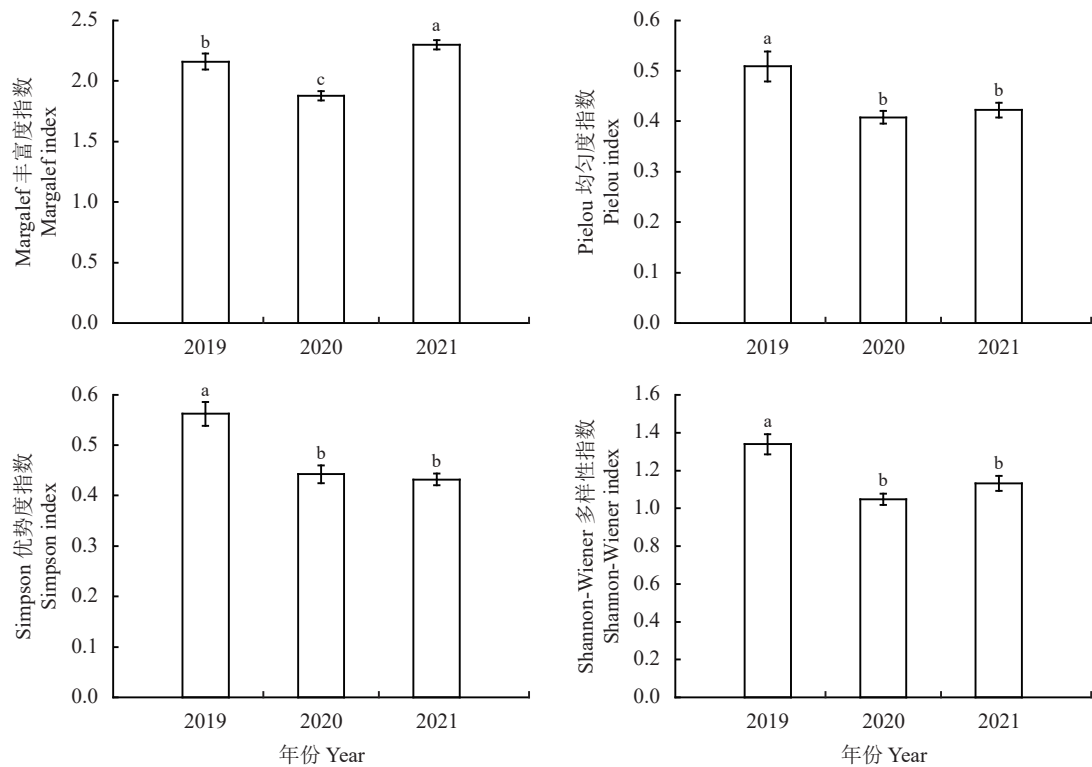


图 5 不同年份对植物多样性单因素方差分析

Figure 5 One-way analysis of variance on plant diversity in different years

器官贮存更多的营养物质,提高其粗蛋白含量^[22]。中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维可直接影响相对饲用价值,中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量越低,相对饲用价值含量就越高^[23]。本研究中相对饲用价值随施肥量的增加呈显著增加的趋势,何亚灵等^[24]在四川湿热地区研究结果也充分证实了这一结论。

3.3 不同年际间施肥方式和施肥量对群落结构的影响

群落物种多样性是反映群落结构可测定性指标^[25]。Zhang 等^[26]在高寒草甸研究发现,随着氮添加水平增大,Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数均显著降低,而本研究中发现无论是氮肥添加量还是添加方式均对植物 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数没产生显著性差异,这是因为氮素和水分是试验区主要的限制因子,年蒸发量大导致添加的氮素大部分随蒸发流失,氮素利用率低使得群落结构没发生显著变化。另一方面,条施氮肥主要是将肥料集中施用于植物根系附近,这种施肥方式使得养分在土壤中分布不均匀,这就加剧了植物种间、种内对养分的竞争,最终影响植

物群落的多样性;而撒施氮肥则是将肥料均匀抛撒在土壤表面,这种施肥方式有利于植物根系早期吸收利用,但随着时间的推移,氮肥的营养成分受到高温、风沙等因素逐渐被风解和风化,导致肥效变差,最终影响植物群落生长。然而在本研究中,Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Pielou指数在 2020 年和 2021 年显著低于 2019 年,豆科、禾本科可食牧草所占比例从 2019 年到 2021 年均逐年增加,杂类草占比逐年减少,这可能是因为 2019 年生长季降水总量高于 2020 年和 2021 年,这与 Wan 等^[27]、Moles 等^[28]的研究结果相符,降水减少导致群落多样性减少,复杂程度变小,植物群落结构发生了改变,进而导致牧草饲用价值发生了改变。

4 结论

本研究在内蒙古温带草甸草原开展为期 3 年的氮素添加试验,结果表明,无论是条施还是撒施,持续长期添加氮素可降低牧草酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维,提高牧草的营养品质;但植物群落结构变化并不明显。研究结果揭示在内蒙古温带草甸草原施加氮肥可提高牧草饲用品质。

参考文献 References:

- [1] 袁沫汐, 文佐时, 何利杰, 李鑫鑫, 赵林. 中国温带草地物候对气候变化的响应及其对总初级生产力的贡献. 生态学报, 2024, 44(1): 354-376.
YUAN M X, WEN Z S, HE L J, LI X X, ZHAO L. Response of temperate grassland phenology to climate change and its contribution to gross primary productivity in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(1): 354-376.
- [2] 李娜, 唐士明, 郭建英, 田茹, 王姗, 胡冰, 罗永红, 徐柱文. 放牧对内蒙古草地植物群落特征影响的 Meta 分析. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1256-1269.
LI N, TANG S M, GUO J Y, TIAN R, WANG S, HU B, LUO Y H, XU Z W. Meta-analysis of effects of grazing on plant community properties in Nei Mongol grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(9): 1256-1269.
- [3] 任海燕, 田磊, 朱毅, 徐柱文, 曾德慧, 方运霆, 韩国栋. 氨水添加改变内蒙古典型草原两种优势植物的氮吸收偏好. 科学通报, 2022, 67(13): 1459-1468.
REN H Y, TIAN L, ZHU Y, XU Z W, ZENG D H, FANG Y T, HAN G D. Nitrogen and water addition alter nitrogen uptake preferences of two dominant plant species in a typical Inner Mongolian steppe. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(13): 1459-1468.
- [4] 李静鹏, 郑志荣, 赵念席, 高玉葆. 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. 植物生态学报, 2016, 40(8): 735-747.
LI J P, ZHENG Z R, ZHAO N X, GAO Y B. Relationship between ecosystem multifunctionality and species diversity in grassland ecosystems under land-use types of clipping, enclosure and grazing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(8): 735-747.
- [5] DENG L, ZHANG Z N, SHANG Z P. Long-term fencing effects on plant diversity and soil properties in China. *Soil and Tillage Research*, 2014, 137: 7-15.
- [6] 张爽, 吕世杰, 丁莉君, 刘佳, 田野, 卫智军, 贾利娟. 羊草草甸草原群落多样性对打孔和施肥的响应. 中国草地学报, 2019, 41(4): 80-86.
ZHANG S, LYU S J, DING L J, LIU J, TIAN Y, WEI Z J, JIA L J. Response of community diversity to drilling and fertilization in *Leymus chinensis* meadow grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(4): 80-86.
- [7] 郭慧慧. 不同施肥对人工羊草地生产力及养分吸收影响的研究. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2016.
GUO H H. Effect of different fertilizers on the productivity and nutrient accumulation of artificial *Leymus chinensis* meadow. Master Thesis. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [8] 车敦仁. 青海高寒牧区禾草施磷施氮的增产效应. 草业科学, 1990, 7(5): 15-20.
CHE D R. Effects of phosphorus and nitrogen on grass yield in Qinghai alpine grassland. *Pratacultural Science*, 1990, 7(5): 15-20.
- [9] PAN Q M, BAI Y F, HAN X G, YANG J C. Effects of nitrogen additions on a *Leymus chinensis* population in typical steppe of Inner Mongolia. *Acta Phytocological Sinica*, 2005, 29(2): 311-317.
- [10] LEBAUER D S, TRESEDER K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89(2): 371-379.
- [11] DU E Z, TERRER C, PELLEGRINI A F A, AHLSTROM A, VAN LISSA C J, ZHAO X, XIA N, WU X H, JACKSON R B. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation. *Nature Geoscience*, 2020, 13: 221-226.
- [12] 高宁. 刈割、施肥对高寒草甸物种多样性、功能多样性与生态系统多功能性关系的影响. 西安: 陕西师范大学硕士学位论文, 2020.
GAO N. Effects of mowing and fertilization on species diversity, functional diversity and ecosystem function in alpine meadow. Master Thesis. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2020.
- [13] 张凤枰, 张芸, 张茹, 宋军, 孙延军, 杜亚欣, 宋涛, 张玮, 李斌, 李永亮, 张小超. 饲料中中性洗涤纤维 (NDF) 的测定 GB/T 20806—2022. 北京: 中国标准出版社, 2022.
ZHANG F P, ZHANG Y, ZHANG R, SONG J, SUN Y J, DU Y X, SONG T, ZHANG W, LI B, LI H L, ZHANG X C. Determination of Neutral Detergent Fiber (NDF) in Feeds GB/T 20806—2022. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [14] 杨发树, 宋军, 张凤枰, 杜亚欣, 宋涛. 饲料中酸性洗涤纤维的测定 NY/T 1459—2007. 北京: 中国农业出版社, 2022.
YANG F S, SONG J, ZHANG F P, DU Y X, SONG T. Determination of Acid Detergent Fiber (ADF) in Feeds NY/T 1459—2007. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
- [15] 胡华锋, 介晓磊, 郭孝, 胡承孝, 严学兵, 王成章, 赵京. 基施硒肥对不同生育期紫花苜蓿营养含量及分配的影响. 草地学报, 2014, 22(4): 871-877.

- HU H F, JIE X L, GUO X, HU C X, YAN X B, WANG C Z, ZHAO J. Effects of Se application as basal fertilizer on the nutrient contents and distribution rates of alfalfa at different growth stages. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(4): 871-877.
- [16] 纪一帆, 吴宝镭, 丁玉华, 钦佩. 大丰野放麋鹿生境中芦苇和互花米草的营养对比分析. *生态学杂志*, 2011, 30(10): 2240-2244.
- JI Y F, WU B L, DING Y H, QIN P. Nutritional components of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in Dafeng free-range David's deer habitat of Jiangsu Province, East China: A comparative analysis. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(10): 2240-2244.
- [17] 徐鑫磊, 宋彦涛, 赵京东, 乌云娜. 施肥和刈割对呼伦贝尔草甸草原牧草品质的影响及其与植物多样性的关系. *草业学报*, 2021, 30(7): 1-10.
- XU X L, SONG Y T, ZHAO J D, Wuyunna. Changes in forage quality and its relationship with plant diversity under fertilization and mowing in Hulun Buir meadow steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(7): 1-10.
- [18] 胡敏, 魏全全, 任涛, 周广生, 余陵峰, 鲁剑巍. 刈割后氮肥施用对饲料油菜地上部产量及品质的影响. *草业科学*, 2017, 34(10): 2124-2129.
- HU M, WEI Q Q, REN T, ZHOU G S, YU L F, LU J W. Effect of nitrogen application on biomass yield and quality of forage rape after clipping. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10): 2124-2129.
- [19] 贾婷婷, 肖玉, 李天银, 刘军, 张月娥. 硫酸对河西走廊紫花苜蓿植株形状、产量及品质的影响. *草原与草坪*, 2015, 35(3): 20-26.
- JIA T T, XIAO Y, LI T Y, LIU J, ZHANG Y E. Effect of sulfur fertilizer on biological characters, yield and quality of alfalfa in Hexi Corridor, Gansu. *Grassland and Turf*, 2015, 35(3): 20-26.
- [20] 霍成君, 韩建国, 洪绂曾, 戎郁萍. 刈割期和留茬高度对混播草地产草量及品质的影响. *草地学报*, 2001, 9(4): 257-264.
- HUO C J, HAN J G, HONG F Z, RONG Y P. Effect of the first clipping dates and different stubble height on the yield and quality of mixture pasture. *Acta Agrestia Sinica*, 2001, 9(4): 257-264.
- [21] DELEVATTI L M, CARDOSO A S, BARBERO R P, LEITE R G, ROMANZINI E P, RUGGIERI A C, REIS R A. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 7596.
- [22] 王桂良, 叶优良, 李欢欢, 朱云集. 施氮量对不同基因型小麦产量和干物质累积的影响. *麦类作物学报*, 2010, 30(1): 116-122.
- WANG G L, YE Y L, LI H H, ZHU Y J. Effect of nitrogen fertilizer application on grain yield and dry matter accumulation for different genotypes of winter wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1): 116-122.
- [23] 马彦麟, 齐广平, 汪精海, 康燕霞, 史晓巍, 贾涪钧, 栗志. 西北荒漠灌区紫花苜蓿产量和营养品质对水肥调控的响应. *甘肃农业大学学报*, 2018, 53(6): 171-179, 186.
- MA Y L, QI G P, WANG J H, KANG Y X, SHI X W, JIA F J, LI Z. Effects of water and fertilizer regulation on yield and nutritional quality of alfalfa grown in irrigated area in northwest desert zone. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, 53(6): 171-179, 186.
- [24] 何亚灵, 韦潇, 曾泰儒, 周冀琼, 凌瑶, 闫艳红. 氮肥水平对豆禾混播草地产量和营养品质的影响. *四川农业大学学报*, 2022, 40(5): 721-745.
- HE Y L, WEI X, ZENG T R, ZHOU J Q, LING Y, YAN Y H. Effect of nitrogen fertilizer levles on yield and quality of legume-grass mixtures. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(5): 721-745.
- [25] 金晓明, 韩国栋. 放牧对草甸草原植物群落结构及多样性的影响. *草业科学*, 2010, 27(4): 7-10.
- JIN X M, HAN G D. Effects of grazing intensity on species diversity and structure of meadow steppe community. *Pratacultural Science*, 2010, 27(4): 7-10.
- [26] ZHANG R, HAO S, DONG S K, LI S, XIAO J N, ZHI Y L. Effects of 5-year nitrogen addition on species composition and diversity of an alpine steppe plant community on Qinghai-Tibetan Plateau. *Plant*, 2022, 11(7): 996.
- [27] MOLOES A T, WARTON D I, WARMAN L, SWENSON N G, SHAWN W. Global patterns in plant height. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 923-932.
- [28] WAN Z Q, YAN Y L, CHEN Y L, GU R, CHEN Y, GAO Q Z. Ecological responses of *Stipa* steppe in Inner Mongolia to experimentally increased temperature and precipitation: Plant species diversity and sward characteristics. *The Rangeland Journal*, 2018, 40(2): 147.

(责任编辑 王芳)