

降水和放牧方式对荒漠草原牧户草场植被覆盖的影响

于佳慧, 王萨仁娜*, 佟宝全

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年4月12日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月22日

摘 要

以四子王旗荒漠草原牧户草场为研究对象, 基于高空间分辨率卫星系列数据, 监测2012~2022年草场植被覆盖时空变化, 利用Pearson系数和偏相关系数分析降水和放牧方式对植被覆盖度影响。结果表明, 研究区植被覆盖度在0.12~0.29内波动变化, 呈现上升趋势; 植被覆盖度时空变化与降水变化呈正相关, 其中与7月有效降水频次相关性显著($p < 0.05$); 放牧方式由春、秋、冬季自由放牧方式转为全年划区轮牧后, 放牧区三个围栏植被覆盖度差异逐渐缩小; 载畜率增加时, 草场植被覆盖总趋势不变, 表明划区轮牧方式对草地覆盖产生积极作用。

关键词

荒漠草原, 植被覆盖度, 降水, 放牧方式, 四子王旗, 牧户

The Impact of Precipitation and Grazing Practices on the Spatiotemporal Changes in Vegetation Cover of Pastures in Desert Grassland Households

Jiahui Yu, Sarenna Wang*, Baoquan Tong

College of Geographic Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Apr. 12th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 22nd, 2025

Abstract

Using the pastures of nomadic households in the desert steppe of Siziwang Banner as the research

*通讯作者。

文章引用: 于佳慧, 王萨仁娜, 佟宝全. 降水和放牧方式对荒漠草原牧户草场植被覆盖的影响[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 803-813. DOI: 10.12677/aep.2025.155091

object, based on high spatial resolution satellite series data, the temporal and spatial changes in pasture vegetation coverage from 2012 to 2022 were monitored. The effects of precipitation and grazing methods on vegetation coverage were analyzed using Pearson coefficients and partial correlation coefficients. The results showed that the vegetation coverage in the study area fluctuated within the range of 0.12 to 0.29, showing an upward trend. The temporal and spatial changes in vegetation coverage were positively correlated with precipitation changes, with a significant correlation ($p < 0.05$) with the frequency of effective precipitation in July. After the grazing method changed from free grazing in spring, autumn, and winter to rotational grazing throughout the year, the differences in vegetation coverage among the three enclosures in the grazing area gradually decreased. When the stocking rate increased, the overall trend of vegetation coverage in the pasture remained unchanged, indicating that the rotational grazing method had a positive effect on grassland coverage.

Keywords

Desert Steppe, Vegetation Coverage, Precipitation, Grazing Method, Siziwang Banner, Households

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

草原是陆地生态系统的重要组成部分,其植被覆盖状况对维持区域生态平衡[1]、水土保持[2] [3]、生物多样性保护[4]等具有关键意义。然而,受到气候变化和人类活动的影响,草原植被覆盖呈现出复杂的时空变化特征[5]。植被覆盖度能够直观反映草地基本情况,是了解草地资源的重要指标之一,学者[6]-[9]利用遥感技术从多时序、多空间尺度关注草原植被覆盖变化,研究其发展趋势及对驱动因子的响应。研究表明降水是植被覆盖度变化[10] [11]、草地初级生产力的主要影响因素,特别是对荒漠草原的影响尤为显著[12],降水增多可以显著提高地上生物量的稳定性,极端干旱会导致优势种地位下降[13]。荒漠草原生态环境脆弱,不仅对降水敏感,放牧也是其植被群落变化的重要影响因子,如春季休牧可改善牧草生长状况[14],划区轮牧可提高牧草产量[15],载畜率的增加使群落植物种数降低[16]、生物量减少[17]。

荒漠草原控制试验发现降水量和放牧对群落特征有重要影响,表现为降水量与植被盖度呈显著正相关[18],适度放牧可以提高水分利用效率,降水增加 26%~50%时植物功能群多样性较高[19]。降水和放牧因子对草地群落的影响主要通过控制试验展开,在牧户草场,长时间尺度上研究降水和放牧对植被覆盖产生的影响文献较少,牧户的草地利用方式对草地可持续发展起到重要作用,因此本研究选择内蒙古四子王旗牧户草场为研究对象,在牧民由自由放牧方式转变为轮牧方式的草场,利用高空间分辨率卫星数据监测 2012~2022 年植被覆盖度变化,通过植被覆盖度与不同时期降水频度和降水量的相关性分析、各轮牧区内植被覆盖度时空变化,了解降水和放牧方式对植被的影响,以为草畜平衡管理提供参考依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区四子王旗荒漠草原牧户草场(图 1),地理坐标 $41^{\circ}51'39''\text{N}$, $111^{\circ}51'07''\text{E}$ 。该区属于温带大陆性干旱半干旱气候区,近十年年平均气温 4°C ,年降水量 300 mm。研究区平均海拔 1507 m,地势西、北部高,东部低。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，植被草层低矮、稀疏。

草场面积为 230 hm²，牧民饲养羊头数约 260 只，载畜率为 1.13 羊单位·hm⁻²·a⁻¹。

牧户草场划分 4 个围栏区域，1，2，3 围栏为放牧区，4 围栏为生活区，放牧围栏内无饮水设施，1 号围栏外侧有饮水点。2011 年之前，放牧区内未做围栏分割，放牧方式为春、秋、冬季放牧，夏季不放牧(在夏营盘放牧)，载畜率为 0.84 羊单位·hm⁻²·a⁻¹；2011 年后放牧区划分 3 个围栏实施全年轮牧，夏季上午 6:00~12:00 时、15:00~19:00 时放牧，傍晚收牧；春、秋、冬季 8:00~17:00 时放牧，傍晚收牧。轮牧时间约 4~5 天轮换一次放牧区。

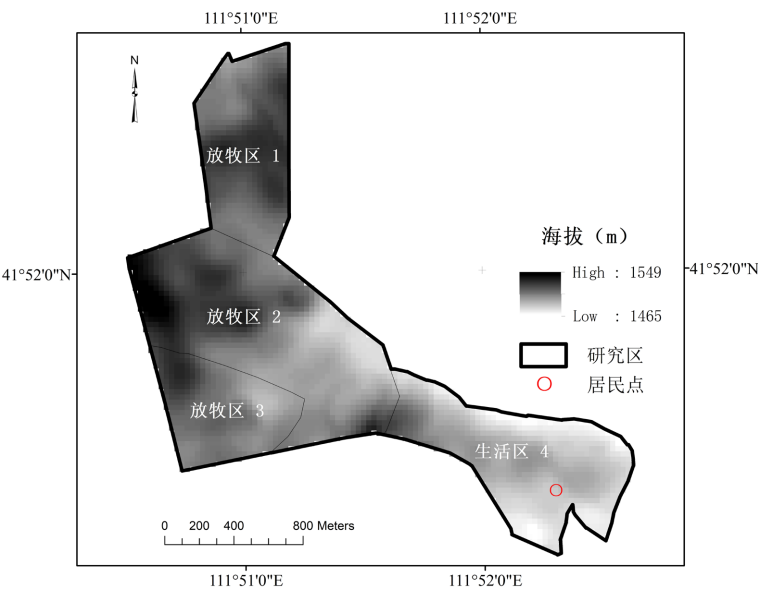


Figure 1. The distribution of terrain elevation of study area
图 1. 研究区高程图

2.2. 数据源

遥感数据为资源卫星、高分卫星多源高空间分辨率商用数据(表 1)，因研究区过境资源有限，获得 2012~2022 年植被生长季 7 月至 10 月预处理 9 期产品(表 1)。

Table 1. Data of remote sensing satellite data
表 1. 遥感卫星数据

卫星数据 Satellite data	时间 Time	全色空间分辨率(米) Panchromatic band spatial resolution (m)
资源三号 Resources satellite three	2012-10-05	2.1
	2013-08-06	2.1
	2014-07-26	2.1
	2015-07-25	2.1
高分二号 Gaofen-2 satellite	2016-08-28	1
高分一号 Gaofen-1 satellite	2019-08-15	1
高分一号 Gaofen-1 satellite	2020-08-02	2
高分六号 Gaofen-6 satellite	2022-08-16	2
高分六号 Gaofen-6 satellite	2021-08-09	2

气象数据选用欧洲中期天气预报中心 2012~2022 年逐日气温和降水数据。

高程数据来自地理空间数据云提供的 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据。

2.3. 研究方法

植被覆盖度计算：采用像元二分模型估算研究区植被覆盖度(FVC)，计算公式为

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (1)$$

$NDVI$ 代表归一化植被指数， $NDVI_{soil}$ 为研究区无植被覆盖的裸土像元值， $NDVI_{veg}$ 为放牧区植被覆盖像元最大值。植被覆盖度值为 $0 < FVC < 1$ 。

驱动因子分析：SPSS 软件中利用 Pearson 系数和偏相关分析植被覆盖度与植物生长季(4 月至 7 月)降水量、降水频次和有效降水量的相关性；单因素方差分析研究区各围栏植被覆盖的差异性。

降水是荒漠草原植物生长的主要驱动因子[12]，与植被覆盖度呈正相关。根据降水对植被生长影响有滞后性特点[20]，将卫星数据获取前植物生长不同时期降水量、有效降水量及其频次与植被覆盖度进行相关性分析。

主要降水数据采用生长季降水总量(4~7 月) [18]和频次、快速生长期(6~7 月)降水总量和频次、当月降水总量(7 月)和频次，以及各时期有效降水总量和降水频次。

有效降水量是指气象学上能够满足作物生长对水分的一定需求的降水。O.E. Sala 在半干旱区的研究认为 5 mm 日降水量是半干旱地区生态系统的重要资源，可以湿润土壤剖面 5 cm，当地优势种对 5 mm 降水有快速的生理响应[21]。荒漠草原降水量少，蒸发量大，土壤水分很难保存，因此本研究对植物生长有影响的降水量以大于 5 mm 的日降水量进行统计。

3. 结果与分析

3.1. 植被覆盖度时空变化

2012~2022 年草场植被覆盖度变化趋势(图 2)表现为，植被覆盖度在 0.12~0.29 内波动变化，有小幅上升趋势。2014 年植被覆盖度最低，2020 年植被覆盖度最高。空间区域上，植被覆盖度差显著，放牧区植被覆盖明显高于生活区(图 3)。放牧区 3 个围栏内部差异不显著，但是呈现出 1 号围栏植被覆盖波动最大，在 2012、2013 年低于 2、3 号围栏，2014 年后有趋近 2、3 号围栏趋势(图 4，图 5)。

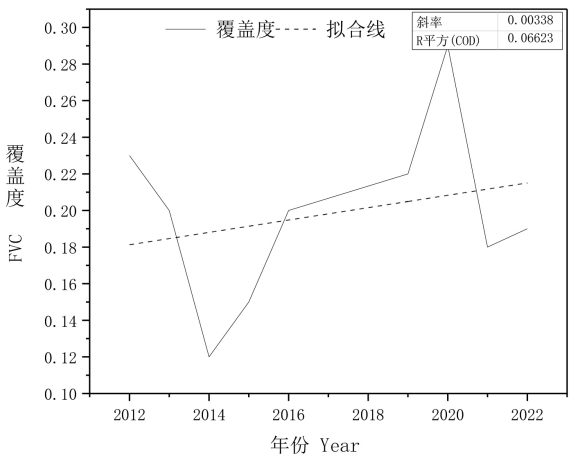


Figure 2. Changes in vegetation coverage in the study area from 2012 to 2022

图 2. 2012~2022 年研究区植被覆盖度变化

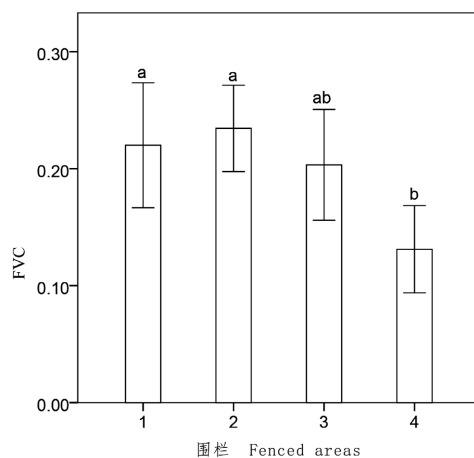


Figure 3. Comparison of FVC in different fenced areas in study area
图 3. 研究区不同围栏植被覆盖度对比

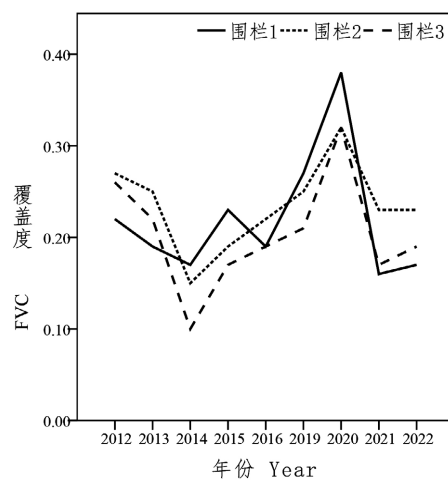
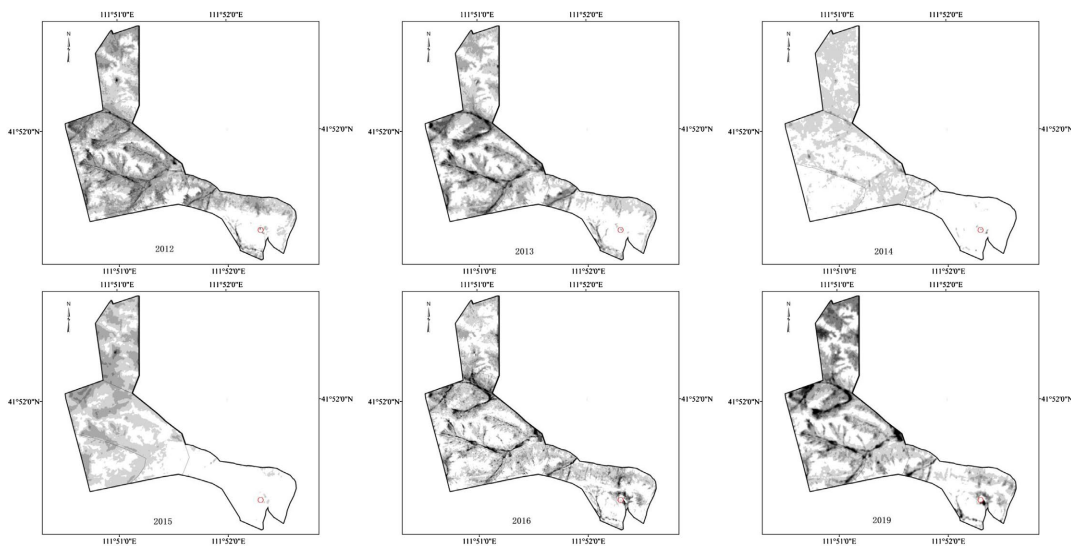


Figure 4. Variation of average FVC in different fenced areas from 2012 to 2022
图 4. 2012~2022 年各围栏植被覆盖度变化



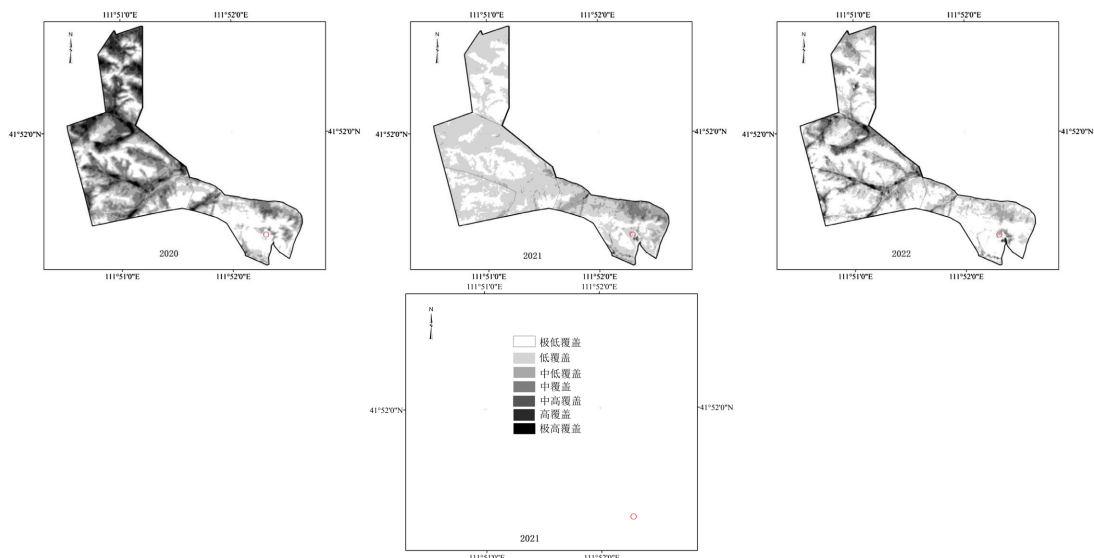


Figure 5. Spatial distribution of FVC in study area from 2012 to 2022
图 5. 2012~2022 年研究区植被覆盖空间分布图

3.2. 降水对植被覆盖度的影响

Pearson 系数显示(表 2), 研究区植被覆盖度与快速生长期有效降水频次相关性高, 其中与 7 月有效降水频次相关性显著, 相关系数为 0.667 ($P < 0.05$)。植被覆盖度与 7 月有效降水频次、有效降水总量的偏相关结果显示(表 3), 植被覆盖度与有效降水频次的偏相关系数高于有效降水总量(图 6), 当 7 月有效降水总量相近时, 有效降水频次越多, 则植被覆盖度越高; 以 50 mm 为线, 当 7 月有效降水总量高于此线时, 草场植被覆盖度高于 0.2, 反之覆盖度低于 0.2。

总体上呈现研究区植被覆盖度受快速生长期降水的影响高于生长季降水, 快速生长期有效降水频次的影响高于有效降水总量。

Table 2. Pearson correlation coefficient
表 2. Pearson 相关系数

降水量与降水频次 Precipitation and precipitation frequency	总盖度 Total coverage	降水量与降水频次 Precipitation and precipitation frequency	总盖度 Total coverage
7 月有效降水频次 The frequency of effective precipitation in July	0.667*	6、7 月总降水量 Total Precipitation in June and July	0.392
6、7 月有效降水频次 The frequency of effective precipitation in June and July	0.531	7 月总降水频次 Total precipitation frequency in July	0.389
7 月有效降水总量 Effective precipitation in July	0.526	6、7 月总降水频次 Total precipitation frequency in June and July	0.212
4~7 月有效降水频次 The frequency of effective precipitation from April to July	0.467	4~7 月有效降水总量 Effective precipitation from April to July	0.193
7 月总降水量 Total Precipitation in July	0.410	4~7 月总降水量 Total Precipitation from April to July	0.037
6、7 月有效降水总量 Effective precipitation in June and July	0.398	4~7 月总降水频次 Total precipitation frequency from April to July	-0.025

*.在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Table 3. Partial correlation coefficient
表 3. 偏相关系数

	7 月有效降水频次 The frequency of effective precipitation in July	7 月有效降水总量 Effective precipitation in July
总盖度 Total coverage	0.501	0.162

*.在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

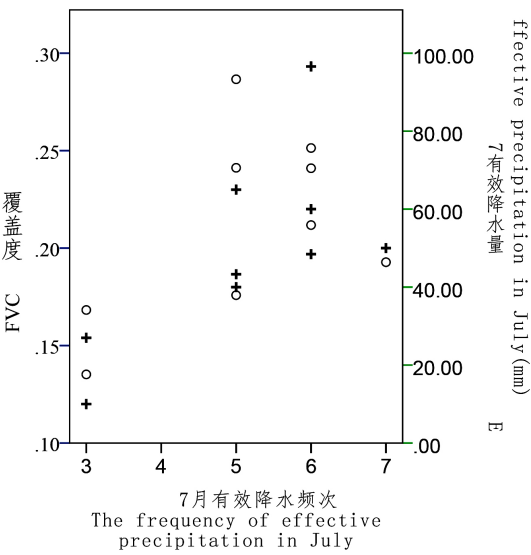


Figure 6. FVC, frequency of effective precipitation, and total effective precipitation
图 6. 植被覆盖度与有效降水频次、有效降水总量

3.3. 放牧方式对植被覆盖度的影响

将研究区植被覆盖度值划分 7 个植被覆盖等级类型(表 4)。

Table 4. Classification of FVC level types
表 4. 植被覆盖度等级划分

FVC	<0.15	0.15~0.25	0.25~0.35	0.35~0.45	0.45~0.55	0.55~0.65	>0.65
等级 Grade	极低覆盖 Ultra-low coverage	低覆盖 Low coverage	中低覆盖 Medium-low coverage	中覆盖 Medium coverage	中高覆盖 Medium-high coverage	高覆盖 High coverage	极高覆盖 Ultra-high coverage

2011 年之前,放牧区草场未做 1、2、3 围栏划分,放牧方式以自由放牧为主,夏季不放牧,春、秋、冬季放牧。在自由放牧方式下植被覆盖在放牧区内部差异较大,总体上呈现围栏 1 区域植被覆盖低于围栏 2 和围栏 3。划区轮牧后,2012 年为轮牧初期,放牧区内植被覆盖变化不明显,1 号围栏植被覆盖以低覆盖为主,占围栏面积 38.4%,其次是中低覆盖,占比 31.6%;2 号围栏的植被覆盖以中低覆盖为主,占比 35.2%,其次是低覆盖,占比 24%;3 号围栏的植被覆盖以中低覆盖为主,占比 34.5%,其次是低覆盖,占比 31.8%(图 7(a))。

采取全年轮牧方式近十二年后,即 2022 年,植被覆盖在放牧区三个围栏内部差异缩小(图 7(b)),三个围栏均以极低覆盖为主,低覆盖次之。1 号围栏植被覆盖度波动幅度最大(图 4),在 2014、2015、2019、2020 年高于 2 号和 3 号围栏,2016、2021 和 2022 年有所回落但仍趋近 3 号围栏。

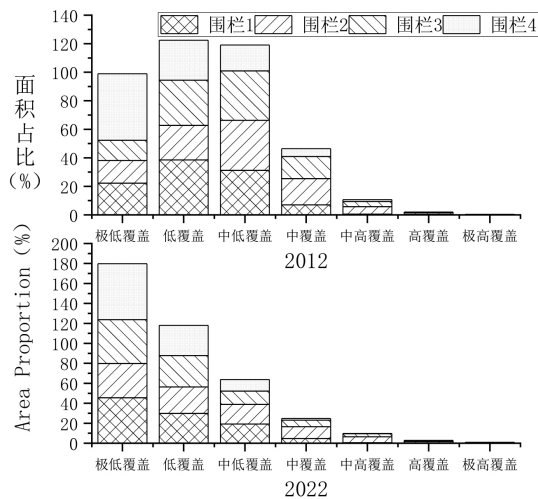


Figure 7. Proportion of FVC at different levels in four fenced areas (%)
图 7. 四个围栏不同等级植被覆盖度面积占比(%)

围栏 1 的植被覆盖明显低于围栏 2 和 3 的原因与羊群采食行为有关。放牧区围栏大门位于 1 号围栏东南，即 1 号和 2 号围栏连接处，饮水区域也位于围栏门外侧。自由放牧方式下，在放牧季早晨放牧时，羊群先于 1 号区域采食，中午饮水和傍晚收牧时也均在 1 号围栏周边活动，使得该区域植被覆盖低于 2、3 围栏区域。羊群牧食行为也受地形因素影响[22]。研究区坡度以斜缓坡和斜坡为主(图 8)，其中 1 号和 3 号围栏微斜坡和斜缓坡面积占比较高，达 66%以上；2 号和 4 号围栏中斜坡面积占比 46%以上。绵羊相对喜欢采食低缓区域牧草，而 2 号围栏因坡度较高，羊群采食时间相对少，植被覆盖度较高；3 号围栏则因离围栏门口较远，在该区域采食时间同样较少，植被覆盖度也偏高。

划区轮牧后，使羊群采食范围缩小[23]，载畜率改变，由自由放牧时期的 $0.84 \text{ 羊单位} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加到 $1.13 \text{ 羊单位} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2 号和 3 号围栏因载畜率增加，植被覆盖变低；1 号围栏则因有休牧时间后，载畜率减少，植被覆盖变高；由此 1、2 和 3 号围栏植被覆盖差异逐渐缩小。生活区没有改变生产生活方式，其植被覆盖变化趋势可以预测放牧区自由放牧方式下的趋势变化。对比放牧区和生活区(图 9)，2012~2022 年植被变化趋势基本一致，表明由原来的夏季不放牧转为全年轮牧后，草场载畜率虽然增加，但是在轮牧管理方式下，草场覆盖未有减少趋势。

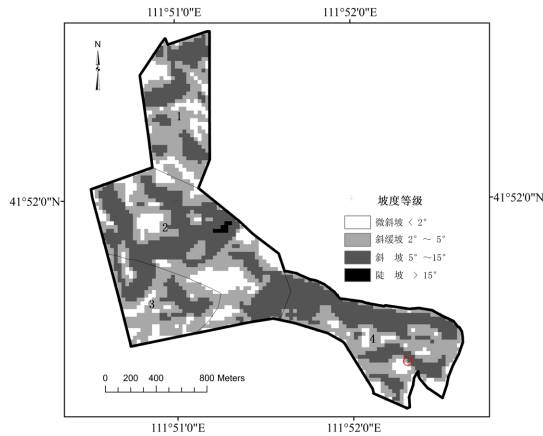


Figure 8. Slope map of the study area
图 8. 研究区坡度图

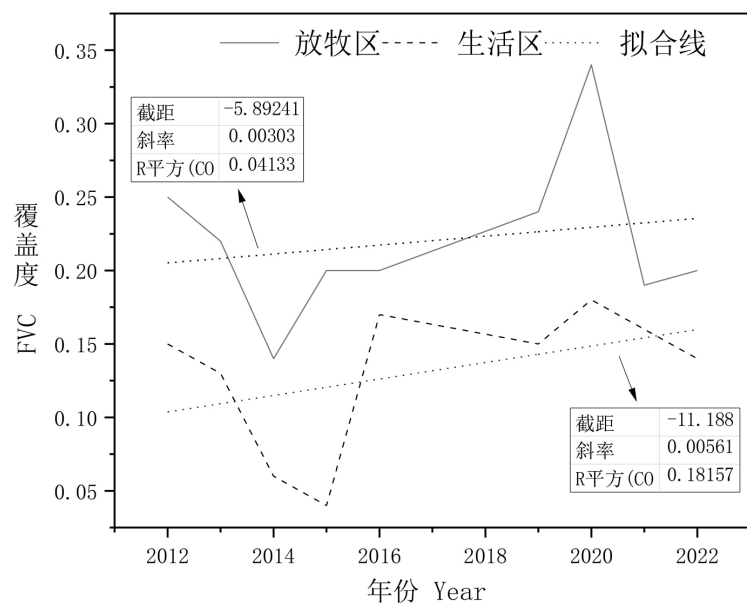


Figure 9. Comparison of FVC changes between grazing areas and living areas
图 9. 放牧区和生活区植被覆盖变化对比图

4. 结论与讨论

2012~2022 年, 研究区草场植被覆盖度在 0.12~0.29 范围内波动, 有上升趋势, 研究结果与徐佳乐[24]的研究结果相似, 荒漠草原植被覆盖时空变化在 2000~2021 年呈上升趋势, 植被覆盖以低覆盖为主(均值: <0.3)。但植被覆盖均值在 2021 年为 0.18, 覆盖度相对较低的原因是空间尺度不同导致, 由于牧户草场空间尺度小, 生活区面积占比大, 人类活动较为频繁, 植被覆盖度较低。

荒漠草原植被覆盖度与 7 月有效降水(≥ 5 mm)频次相关性显著($p < 0.05$)。本研究发现在有效降水总量相同条件下, 呈现随着有效降水频次多植被覆盖度变高的特征, 这与 Zhang, B. 结果一致, 地上植物生物量对大降雨事件(≥ 5 mm)的变化更为敏感[25]。荒漠草原降水少, 蒸发量大, 能够湿润植物根茎的 5 mm 以上有效降水可以促进植物生长, 同时, 有效降水的频次增多促进土壤湿度的持续性。许多研究也表明小于 5 mm 的降水只能湿润土壤表层, 不能达到植物根系, 尤其是小于 2.5 mm 的降水会被植物冠层截留, 对植物生长没有产生促进作用[26][27]。毛乌素沙地的研究发现小于 5 mm 的降水基本对固定沙地灌木根系层没有产生补水作用[28]。典型草原的研究发现群落生物量与生长季降水量、降水集中度呈显著的正相关关系[29], 表明降水频次的提高有助于植被的生长。

轮牧方式缩小放牧区植被覆盖空间差异, 缓解载畜率增加带来的压力。草地利用方式和载畜率是草地群落出现空间差异的主要影响因子。自由放牧时期, 研究区草地利用方式为春、秋、冬季放牧, 夏季不放牧(夏季在夏营盘放牧), 载畜率较低, 放牧区草地覆盖有明显空间差异。2011 年后改为全年放牧后, 羊群数量未变, 载畜率相对增加, 放牧区内植被盖度空间差异逐渐缩小。对比多年利用方式不变的生活区, 利用方式有明显变化的放牧区植被覆盖与生活区变化趋势一致, 表明载畜率增加没有使草场盖度降低, 其主要原因是划区轮牧有效缓解了放牧压力。研究表明高频轮牧可显著提高典型草原的地上生物量、植被盖度和植物高度[30], 通过在空间上控制牲畜采食范围, 给牧草一定的恢复时间, 能够减少持续啃食压力, 使优势种恢复生长, 避免过度退化。轮牧作为一种适应性放牧管理策略, 通过周期性地调整放牧区域和放牧强度, 促进植被恢复、维持土壤健康, 并提高生态系统稳定性, 是保障牧民经济与生态平衡的有效的草地利用方式。

基金项目

国家自然科学基金项目(42261053); 内蒙古师范大学引进高层次人才科研启动经费项目(2016YJRC016)。

参考文献

- [1] 张宇, 侯路路, 闫瑞瑞, 等. 放牧强度对草甸草原植物群落特征及营养品质的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2550-2561.
- [2] 刘纪根, 张昕川, 李力, 等. 紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 16-20, 27.
- [3] Huang, Z., Miao, H., Liu, Y., Tian, F., He, H., Shen, W., *et al.* (2018) Soil Water Content and Temporal Stability in an Arid Area with Natural and Planted Grasslands. *Hydrological Processes*, **32**, 3784-3792. <https://doi.org/10.1002/hyp.13289>
- [4] 徐柱, 闫伟红, 刘天明, 等. 中国草原生物多样性、生态系统保护与资源可持续利用[J]. 中国草地学报, 2011, 33(3): 1-5.
- [5] 阿卜杜热合曼·吾斯曼, 玉素甫江·如素力, 王雪梅, 等. 博斯腾湖流域草地植被覆盖度时空格局变化及影响因素[J]. 草业科学, 2023, 40(6): 1518-1531.
- [6] 候静, 杜灵通, 刘可, 等. 1982-2012 年北半球荒漠草原过渡带植被物候特征及其与气候因子的关系[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 473-482.
- [7] 王宏, 李晓兵, 李霞, 等. 中国北方草原对气候干旱的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 172-182.
- [8] 杭玉玲, 包刚, 包玉海, 等. 2000-2010 年锡林郭勒草原植被覆盖时空变化格局及其气候响应[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1194-1204.
- [9] 张生军, 王涛, 王天明, 等. 新疆不同植被 NDVI 的变化及其与气候因子的关系[J]. 草业科学, 2009, 26(5): 26-31.
- [10] 沈贝贝, 魏一博, 马磊超, 等. 内蒙古草原植被覆盖度时空格局变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 118-126.
- [11] 李晶, 刘乾龙, 刘鹏宇. 1998-2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 220-235.
- [12] 穆少杰, 李建龙, 杨红飞, 等. 内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 6-15.
- [13] 吴旭东, 蒋齐, 王占军, 等. 降水对荒漠草原地上生物量稳定性的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(11): 30-39.
- [14] 李青丰, 赵钢, 郑蒙安, 等. 春季休牧对草原和家畜生产力的影响[J]. 草地学报, 2005, 13(z1): 53-56, 66.
- [15] 卫智军, 常秉文, 孙启忠, 等. 荒漠草原群落及主要植物种群特征对放牧制度的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 188-191.
- [16] 焦树英, 韩国栋, 李永强, 等. 不同载畜率对荒漠草原群落结构和功能群生产力的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(3): 564-571.
- [17] Wang, Z., Jiao, S., Han, G., Zhao, M., Ding, H., Zhang, X., *et al.* (2013) Effects of Stocking Rate on the Variability of Peak Standing Crop in a Desert Steppe of Eurasia Grassland. *Environmental Management*, **53**, 266-273. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0186-6>
- [18] 李江文, 房美艳, 张晓曦, 等. 降水和载畜率对短花针茅荒漠草原物种及功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(19): 8627-8635.
- [19] 刘欣蕊, 崔媛媛, 王忠武, 等. 放牧和模拟降水对短花针茅荒漠草原植物功能群多样性的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(3): 868-875.
- [20] 陈效述, 王恒. 1982-2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 84-94.
- [21] Sala, O.E. and Lauenroth, W.K. (1982) Small Rainfall Events: An Ecological Role in Semiarid Regions. *Oecologia*, **53**, 301-304. <https://doi.org/10.1007/bf00389004>
- [22] 王萨仁娜, 韩国栋, 张圣微, 等. 基于 3S 技术的绵羊牧食行为与草地环境相互作用研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 860-867.
- [23] 卫智军, 白云军, 乌日图, 等. 荒漠草原不同放牧方式绵羊牧食策略研究[J]. 草地学报, 2005, 13(z1): 57-61.
- [24] 徐佳乐, 杨兴川, 赵文吉, 等. 气候变化背景下内蒙古中西部植被覆盖度演变特征研究[J]. 生态环境学报, 2024,

- 33(7): 1008-1018.
- [25] Zhang, B., Cao, J., Bai, Y., Zhou, X., Ning, Z., Yang, S., *et al.* (2012) Effects of Rainfall Amount and Frequency on Vegetation Growth in a Tibetan Alpine Meadow. *Climatic Change*, **118**, 197-212. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0622-2>
- [26] Dougherty, R.L., Lauenroth, W.K. and Singh, J.S. (1996) Response of a Grassland Cactus to Frequency and Size of Rainfall Events in a North American Shortgrass Steppe. *The Journal of Ecology*, **84**, 177-183. <https://doi.org/10.2307/2261353>
- [27] Owens, M.K., Lyons, R.K. and Alejandro, C.L. (2006) Rainfall Partitioning within Semiarid Juniper Communities: Effects of Event Size and Canopy Cover. *Hydrological Processes*, **20**, 3179-3189. <https://doi.org/10.1002/hyp.6326>
- [28] 郭柯, 董学军, 刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点——兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 275-279.
- [29] 苗百岭, 梁存柱, 史亚博, 等. 降水变化对内蒙古典型草原地上生物量的影响[J]. 植物生态学报, 2019, 43(7): 557-565.
- [30] 茹雅倩, 薛建国, 葛萍等, 等高频轮牧对典型草原生产生态效果的影响[J]. 植物生态学报, 2024, 48(2):171-179.