

# 放牧在森林和草原防火工作中的应用：多维度效益与阈值争议分析

张凯旋<sup>1</sup>, 王海晖<sup>1\*</sup>, 吴泽鹏<sup>2</sup>, 盛昌栋<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学火灾安全全国重点实验室, 安徽 合肥

<sup>2</sup>广东省林业科学研究院, 广东 广州

<sup>3</sup>东南大学能源与环境学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年8月28日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年9月29日

## 摘要

全球森林和草原火灾频发, 对自然资源、经济和生态环境构成重大威胁。传统火灾管理措施成本高、环境污染难以控制且面临人力短缺问题, 亟需探索新的、可持续的防火方法。本文借鉴西方国家放牧研究成果, 探讨定期放牧、轮牧和季节性放牧等方法在森林和草原防火工作中的应用潜力。研究发现, 放牧通过控制植被生长和密度, 减少可燃物载量, 调节植被结构和含水率, 降低火灾风险, 同时提升生态系统功能。关于“适度放牧”的量化标准目前存在争议, 不同区域和植被类型下的火险控制阈值难以统一。现有研究多依赖短期、小尺度实验, 难以反映长期、大尺度放牧的累积效应。本文提出构建多维度加多尺度理论架构, 涵盖火险控制、生态保护和社会经济三个维度, 实现防火工作的有效性与经济性平衡。未来需加强跨学科研究, 推动放牧与防火工作的融合, 构建多层次防火体系, 提升防火工作的多元化和有效性。

## 关键词

生态防火, 放牧, 森林草原火险, 森林草原火行为, 生态管理

## Application of Grazing in Wildfire Prevention Sector: Multi-Dimensional Benefits and Threshold Controversy Analysis

Kaixuan Zhang<sup>1</sup>, Haihui Wang<sup>1\*</sup>, Zepeng Wu<sup>2</sup>, Changdong Sheng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui

\*通讯作者。

文章引用: 张凯旋, 王海晖, 吴泽鹏, 盛昌栋. 放牧在森林和草原防火工作中的应用: 多维度效益与阈值争议分析[J]. 林业世界, 2025, 14(4): 553-564. DOI: 10.12677/wjf.2025.144066

<sup>2</sup>Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou Guangdong<sup>3</sup>School of Energy and the Environment, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Received: August 28, 2025; accepted: September 22, 2025; published: September 29, 2025

## Abstract

Frequent forest and grassland fires pose significant threats to natural resources, the economy, and the ecological environment around the world. Traditional fire management measures are often expensive, environmentally harmful, and challenged by labor shortages, necessitating the exploration of new and sustainable fire prevention methods. Drawing on the available research findings on grazing from Western countries, this paper explores the potential application of regular grazing, rotational grazing, and seasonal grazing in forest and grassland fire prevention. The study finds that grazing can reduce fire risks by controlling vegetation growth and density, decreasing fuel load, and altering vegetation structure and moisture content, while also enhancing ecosystem functions. There is significant controversy over the quantification of “moderate grazing”, with fire risk control thresholds varying across regions and vegetation types. For instance, while low to moderate grazing significantly reduces fire risks in shrub-grassland ecosystems, it may exacerbate vegetation dryness and create a paradox of low grazing intensity and high fire risk in semi-arid grasslands in Inner Mongolia. Existing studies, mostly relying on short-term, small-scale field experiments, fail to reflect the cumulative effects of long-term, large-scale grazing on fire risks and ecosystems. This paper proposes a multi-dimensional and multi-scale theoretical framework that encompasses covering fire risk control, ecological protection, and socio-economic aspects, aiming to achieve a balance between the effectiveness and cost-efficiency of fire prevention work. Future research should strengthen interdisciplinary studies, promote the integration of grazing with fire prevention, and build a multi-level fire prevention system to enhance the diversification and effectiveness of fire prevention efforts.

## Keywords

Ecological Fire Prevention, Grazing, Forest and Grassland Fire Risk, Forest and Grassland Fire Behavior, Ecological Management

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

近年来全球森林草原火灾频发，仅 2019 年全球森林火灾超过 450 万起，是 2001 年的 2.5 倍[1]。美国、澳大利亚和巴西等国常受大规模森林火灾影响，导致巨大的经济损失和生态破坏。据国家林业和草原局统计数据，近 10 年我国年均森林火灾约 3000 次，总受灾面积数十万公顷[2]。火灾不仅威胁生态系统，更加剧全球变暖，森林和草原火灾有发展的趋势。

以往采用的预防森林和草原火灾的措施包括机械处理、计划火烧和化学除草方法，普遍存在成本高或易于造成环境污染等问题[3][4]。为控制火灾防治工作成本，土地管理者和政府官员致力于寻求创新性预防管理技术。自 20 世纪 60 年代，美国开始关注放牧作为可燃物管理手段。通过引入放牧防火理念，美国加州和科罗拉多等州森林管理部门尝试利用放牧进行植被管理。在 20 世纪中期至末期，爱达荷州牲畜数量达到 120 万头规模[5]。

目前，美国和澳大利亚等西方国家系统且广泛地实施放牧管理计划。林业部门和消防机构定期评估并实施策略，以获取相应的支持和资源。放牧管理主要用于国有和私人林地，减少可燃物积累，特别是在高火险地区，放牧被视为降低火灾风险的关键措施而广泛推广[6]。与此同时，科学家研究放牧与生物多样性保护相结合以促进生态系统的恢复，并用于生态恢复和资源管理[7]。相比之下，中国尽管放牧面积较大，但放牧管理区域面积少，受传统农业和城市化限制，技术水平不一[8]。相关研究见诸期刊也较少。由于过多的依赖地方政府和社区参与，加上缺乏系统政策和科学管理，难以实现有效的协调与资源配置，导致放牧管理效果不佳。

本文借鉴西方国家研究的成果，探讨放牧在森林和草原可燃物管理中的作用及其对火险和潜在火行为的影响，并分析其防火机制和产生的生态效益。结合现有防火技术，阐述国内林草防火管理工作的发展方向和目标定位。适当放牧作为成本效益高且环保的燃料管理替代方法，是可行的生态防火技术，有利于森林生态的长期稳定，由此实现人与自然和谐共存。

2. 主要放牧方法和应用现状

作为一项有组织和可控的野外操作，其实施方式、密度和频率有高度确定性，相应产生可接受的生态和环境效果。常用的方法包括定期放牧、轮牧和季节性放牧，相应开发出放牧密度管理办法(表 1)。定期放牧是一种在固定时间间隔进行放牧的管理方法，预先设定放牧时间，不依赖牧草生长或气候条件。适用于草本植物生长周期稳定的干旱和半干旱地区[7]，有助于草地恢复和防止退化。放牧时间需考虑牧草恢复力、牲畜营养需求和土地生产力，并根据草场恢复情况调整放牧强度和时间。在澳大利亚，放牧被用于控制灌木生长，其干旱牧区放牧周期为 30~60 天，以适应极端气候和土壤条件[9]；新疆半干旱草原放牧周期约 20~30 天[10]。

Table 1. Outline of grazing methods and implementation details [7] [9]-[16]

表 1. 放牧方法及其实施细节对比[7] [9]-[16]

| 放牧方法   | 适用林分                       | 地表可燃物            | 放牧区域设置                         | 放牧操作要点                                    |
|--------|----------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|
| 定期放牧   | 生长周期稳定的草地，尤其是干旱和半干旱地区草原；   | 主要是干草、灌木和其他杂草；   | 地势平坦、灌木稀疏的区域，避开易积水和荫蔽地带；       | 1) 确定放牧时段；<br>2) 确定放牧强度；<br>3) 定期检查草场情况。  |
| 轮牧     | 多样化植被和异质性土壤的地区，尤其是高产草地和草原； | 动态变化，包括嫩草、野花和灌木； | 划分片区，定期轮换，确保每片区有足够的恢复时间；       | 1) 划分放牧区；<br>2) 建立轮牧计划；<br>3) 定期移动牲畜。     |
| 季节性放牧  | 季节变化显著的地区，如北方草原和高原地区；      | 主要是干草，干燥草原上的可燃物； | 靠近水源、气候适宜的区域，考虑季节性气候变化；        | 1) 选择放牧季；<br>2) 监测草场状况；<br>3) 调整放牧时间和密度。  |
| 放牧密度管理 | 所有类型草地，特别是在草地生态系统承载力不稳定地区； | 细小的干草、杂草和低矮的灌木；  | 根据地形和草种分布合理配置，确保每个区域都有适宜的放牧密度； | 1) 评估草地的承载能力；<br>2) 确定放牧密度；<br>3) 定期监测调整。 |

轮牧是一种将牧场分成若干个小区，交替放牧以优化草地资源利用的管理方法。该方法适用于草原和农田结合、多样化植被和异质性土壤的地区，尤其是高产草地和草原。有的地域生长期短，非生长期长；如，内蒙古春夏季放牧周期为 15~20 天和 10~15 天，秋冬季则超过 30 天[12]。高海拔地区(如西藏)牧草生长期短，需要更长休牧期；同样，湿润区恢复快，周期短。考虑牧草生长、牲畜需求、气候、土壤

和牧场健康,可以合理设计分区、轮牧时间表和放牧强度,确保恢复时间充足并维持草地健康状况(表 1)。南非草原带土著牧民常采用轮牧方式实施放牧,相应减少地表生物质量[11]。

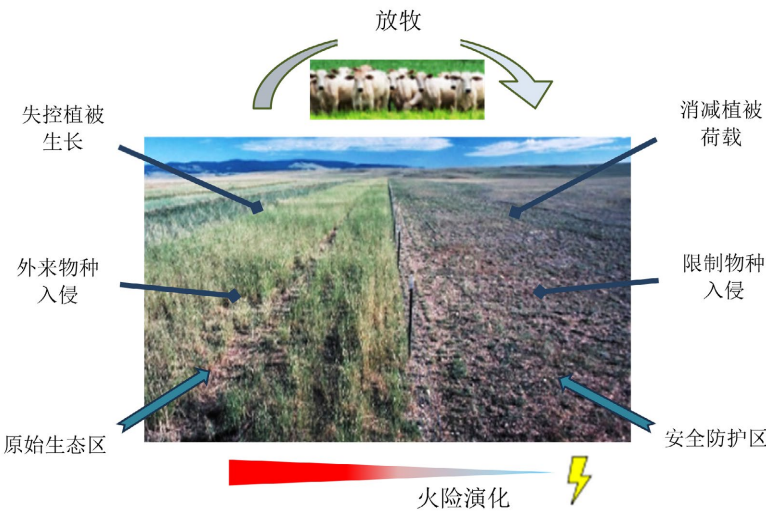
季节性放牧依据季节变化、牧草生长和牲畜需求调整放牧时间和强度,旨在可持续利用草地资源并保持牲畜健康。较适用于季节变化显著地区,如北方草原和高原、涵盖山地草原与河谷平原,见表 1。春夏牧草营养高,适合放牧;冬季和旱季则应减少密度或暂停放牧以保护草地。以 Pampa 草原为例,牧草四季生长,但夏季降雨丰富,牧草的生产力在夏季达到顶峰,因而在夏季集中放牧[13]。北欧地区农民随季节变化调整放牧位置,夏季在高山放牧,春秋则在低地[14]。季节性放牧常结合生态保护措施,避免在草地生长初期和恢复期过度放牧,确保植被和土壤健康(表 1)。

放牧密度管理指控制特定牧场或区域内的牲畜数量,确保草地资源可持续利用和牲畜健康的管理办法[15]。适用于各类草地,特别是在草地生态系统承载力不稳定的地区(表 1)。通过评估草地承载力,设定最优牲畜数量,避免过度放牧。根据地形和草种分布合理配置放牧区域,同时监测草地生长和环境变化以调整放牧密度。管理依赖于牧草承载力、牲畜需求、气候和土地健康等因素(表 1)。高承载力地区可增加放牧密度,干旱地区需限制,如澳大利亚干旱牧区限制在  $0.2\sim0.4$  头牛· $\text{hm}^{-2}$  [16],湿润地区则可适度提高放牧密度。

### 3. 放牧对森林草原火险的影响

火险是对森林和草原地表可燃物易燃程度进行的评估,通常分为低、中、高和极高四级[17]。其中,低火险等级,指火险条件良好,火灾发生风险较低,但仍需注意防火工作;中火险等级,火险条件较为平稳,火灾发生风险中等,需保持警惕;高火险等级,火险条件显著,火灾发生风险较高,需加强监测和防控;极高火险条件,火灾发生的可能性极大,扑救难度大[18]。

放牧与植被分布及火险之间存在复杂的相互作用,这些作用可以相互促进,也可以相互抑制。放牧有助于促进本土草本植物生长,减少入侵性一年生草。牲畜在林区内活动会减少地表生物质量,牲畜的啃食也相应提高枝下高,从而具备了类似工程隔离带或遮荫型防火隔离带的功能,减少火灾的发生[19]。如图 1 所示,放牧家畜的活动也可自然形成防火隔离带,减缓火势向无放牧区域蔓延的速度;与此同时,针对性的春季放牧有助于减少入侵性一年生草。这同样被地中海国家相关研究所证实[20]。



**Figure 1.** Fire prevention mechanism via grazing: constructing surface fuel characteristic change scenarios through winter grazing compared to non-grazing areas in southeastern Oregon [15] [21]

**图 1.** 基于俄勒冈州东南部冬季放牧区和未放牧区的地表燃料特征变化场景构建的放牧防火机理[15] [21]

加利福尼亚州沿海七个县的景观植被以草原灌木为主。结合 2001 年至 2017 年七个县牧场的放牧数据以及环境变量, Siegel 等采用 Logistic 混合效应模型分析放牧产生的火险变化。分析表明, 随着放牧强度的增加, 植被年度受灾几率下降 0.8%~3.6% [22]。近些年, Orr 等[23]在俄勒冈州东部的原生灌木草原观察放牧产生的火险变化, 发现放牧会对消减地表植被着火可能性产生重大影响。Zong 等[24]针对我国东北地区针叶林防火策略问题开展研究, 以辽宁省七盘山为研究对象, 结合火灾可能性、暴露程度和火灾影响三个方面因素评估火灾风险。结果表明, 可燃物处理等措施可以将不同区域的火灾风险分别减少 44.7% (高风险区) 和 20.3% (极高风险区)。其中, 14.7% 的森林区域的火灾风险分别从极高/高降至极低/低。这同样反映了放牧作为一种可燃物处理措施的有效性[24]。

Davies 等[21]以俄勒冈州东南部大型鼠尾草-束草群落(*Artemisia tridentate*)为例, 研究秋冬季牛放牧对外来一年生草入侵牧场的影响。研究数据表明, 与秋冬季放牧相比, 4 年后未放牧区域的外来草覆盖率高出 1.5 倍。更为有趣的是, Schachtschneider 等[25]观察发现, 在灌木覆盖率低于 18% 时, 低度至中度放牧能有效降低火灾风险, 这是缘于此情形下火蔓延参数与植物群落中的草本植被数量、草高和一年生草量呈正相关。当灌木树冠覆盖率较高(>18%)时, 灌木生长较为强势, 地表草本植物生长受限, 由牛啃食产生燃料消减的效果不明显。与此同时, 灌木树冠本身很可能会成为火灾蔓延的载体, 形成强度较大火灾的风险陡增, 对植被和周围环境的影响因而也有所增强。

家畜踩踏草地有助于水分渗透, 从而缓解草地干燥程度, 降低火灾风险。Ming 等[26]在中国黄土高原延安的吴起县通过围栏放牧试验, 测量了非放牧区和 5 种强度放牧下地表入渗率, 其中  $G1 = 2.2$  只羊· $\text{hm}^{-2}$ 、 $G2 = 3.0$  只羊· $\text{hm}^{-2}$ 、 $G3 = 4.2$  只羊· $\text{hm}^{-2}$ 、 $G4 = 6.7$  只羊· $\text{hm}^{-2}$ 、 $G5 = 16.7$  只羊· $\text{hm}^{-2}$ , 放牧时间均为 3h/d。试验显示,  $G1$  和  $G2$  区水入渗率增加了 24%~47%,  $G1$  区稳定入渗率和平均入渗率分别增加了约 56% 和 33% [26]。当放牧强度从  $G2$  跃迁至  $G5$ , 初始渗透率、稳定入渗率和平均入渗率都因放牧强度的陡增而下降。渗入土壤的水越多, 通过径流流失的水就越少, 土壤含水率也就越高。合理的放牧强度可使地表径流减少 42%~82% [27], 从而显著提升土壤的保水能力。然而, 如果放牧强度过高(放牧量超过了环境或者植被的承载能力), 会使植物无法完成生长周期, 降低植被覆盖率。这意味着土壤裸土面积的增加, 使得土壤的水分保持能力和养分保持能力下降, 由此削弱植被的恢复能力。生态环境的破坏或植物群落的持续退化, 则会使环境更加干燥, 反而会增加火灾的风险[28]。

作为一项防火措施, 放牧活动本身也有利于降低火灾风险。首先, 放牧人员可以有护林员身份, 同步观察森林植被覆盖情况、干旱程度以及火灾隐患。其次, 活动区域可以控制人为火源。放牧活动的区域人口密度相对较低, 意味着出现人为火源的可能性更低, 可以有效地减少人为火灾的发生, 降低火灾的风险。再则, 为当地防火宣传教育提供机会。放牧可以同步向公众传达防火知识, 协助公众学习森林草原管理和防火知识技能。另外, 放牧活动对于提供森林草原早期火灾预警具有积极作用。通过引入人员流动, 结合牲畜的异常反应和环境变化的观察, 及时反馈出现的问题, 减少森林草原火灾造成的损失。

#### 4. 放牧对林草潜在火行为的影响

适度放牧会减少火灾蔓延潜力, 同时提高景观异质性, 为敏感生物提供避难所。如前边提到的, 在俄勒冈州东部的原生灌木草原, Orr 等[23]同时观察放牧强度对燃料特性以及火灾行为的影响随年份变化, 发现 2018 年未放牧或轻度放牧地的火灾蔓延可能性比高放牧地高 40%, 未放牧地的火灾蔓延可能性比中等放牧地区高 20%。2020 年至 2021 年间, 未放牧处理的火灾传播几率比高强度处理高 40% 左右。作为野火管理工具, 对特定景观植被实施中等强度和高强度的放牧可以降低特定生态系统中火灾蔓延可能性[23]。

合理的放牧管理(如轮牧)可以抑制低矮灌木的生长, 减少地面燃料, 改善局部空气流通性。即使在火

灾发生时,火势也较弱。在欧洲地中海区,放牧就被用于控制灌丛和草丛,降低火焰高度。Launchbaugh 等[5]展示了墨菲荒野大火中心地域过火后场景,其中具有不同放牧制度的牧场过火后形成鲜明对比(图 2),反映了放牧管理对管制区域过火的烧损情况产生重大影响。



**Figure 2.** Striking contrast after fire for the pastures with different grazing regimes on both sides of the fence [5]  
**图 2.** 栅栏两侧具有不同放牧制度的牧场过火后形成鲜明对比[5]

Evans 等人[29]通过量化牛放牧前后豚鼠草(*Megathyrus maximus*)草原生态系统中活细小燃料荷载和水分分布数据,运用 BehavePlus 程序模拟放牧和未放牧豚鼠草草原的潜在野火行为。针对低燃料水分和平均燃料水分情景下的野火行为预测表明,放牧使潜在火蔓延速度降低了 44%~52%,而火焰长度则降低了 36%~41%,有效减轻了火灾造成的破坏。

放牧管理对控制火灾面积至关重要,合理放牧可降低火灾面积。南非的研究显示,轮牧地区过火面积平均可减少 50% [30]。放牧能够有效转变火灾动态,避免大规模的燃烧。但是,过度放牧则可能导致草原退化,土壤干燥程度加剧[31],从而增加火灾面积。巴西的一项研究显示,过度放牧以及森林开发使得火灾面积增加近 30% [32]。

在火灾频发地区,放牧可以成为综合火灾管理策略的一部分,结合其他措施降低地表燃料的荷载。这种生物清理方式可以替代机械清理等方法,减少森林资源的扰动,提升生态环境质量[5]。放牧作为一种传统的土地利用方式,牲畜活动会形成旱草坪,这是一种天然防火带;与此同时,合理放牧管理可保持植被高度,维持现有防火带功能,降低火灾蔓延几率。

## 5. 与平行防火技术的对比

放牧的引入展示出防火手段多样性。这里对放牧与其他可燃物处理方法作对比,包括计划烧除、机械处理、除草剂以及几种防火隔离带技术。

放牧通常被认为是比计划火烧更优越的生态管理手段,如表 2 所示。美国科罗拉多州大学的研究人员研究发现,适度放牧可以促进草地生态系统稳定,降低草地的火灾风险,并有助于草地植被和结构的多样性[11]。相比之下,计划火烧虽能降低火灾风险,但可能引发土壤质量和一系列环境污染问题(表 2)。Starns 等[33]针对南部大平原四个地点分别评估了计划火烧和放牧对牧场燃料的影响,在灾后 43 个月内采样并运用 BehavePlus 5.0 软件模拟潜在火行为。测试与研究表明,放牧可以在 36 个月内保证可燃物荷载低于  $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,而计划火烧后 24 个月可燃物荷载便超过  $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,且模拟出的火焰长度和蔓延几率均高于放牧处理过的情形。

**Table 2.** Advantages, disadvantages and cost comparisons of different fire prevention measures (Costs estimated based on 2023 prices) [37]-[40]  
**表 2.** 不同防火措施的优缺点及其开销比较(费用根据 2023 年成本大致估计) [37]-[40]

| 防火措施  | 优点                     | 缺点                                | 开销估算(每公顷)                            |
|-------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 放牧    | 自然控制杂草和灌木，生态友好，经济收益；   | 可能导致土壤侵蚀和压实，对某些植物造成过度影响；          | 每年 300~700 美元，收益则在几千美元以上，视放牧和牲畜类型而定。 |
| 计划火烧  | 控制小灌木和杂草，增加土壤肥力，减少病虫害； | 限于特定气候和环境条件可能失控，引发火灾，对某些动植物种造成威胁； | 50~150 美元，包括人力、设备和燃料成本。              |
| 机械处理  | 快速处理大面积区域，选择性去除特定植物；   | 技术和设备成本高，导致土壤压实，需定期维护；            | 200~500 美元 (根据设备和作业类型)。              |
| 除草剂   | 高效控制杂草，选择性去除特定植物；      | 环境和水源污染，对非靶标生物有负面影响，长期使用导致抗药性；    | 100~300 美元，取决于除草剂类型和技术。              |
| 生物防火林 | 提供天然屏障，维护生物多样性，提供栖息地；  | 建设和维护成本高，效果需要较长时间显现；              | 300~1500 美元，取决于树种和管理措施。              |
| 防火隔离带 | 有效降低火蔓延风险，相对较低的维护成本；   | 需要定期维护和清理；不合理设计时，效果有限；            | 100~300 美元，包括清理和管理成本。                |

针对特定林区放牧产生的可燃物稀化效果，实则与行业内推行的遮荫型防火隔离带相近。作为西方较流行的可燃物处理方法，遮荫型防火隔离带通常以机械或人工处理等方式将地表可燃物载量降低到 4.5 t·hm<sup>-2</sup> 以下，同时普遍提升树冠层基部距离地面的高度[34]。只是隔离带内需要定期维护和清理，涉及每公顷每年约 100~300 美元的清理和管理成本[35]。相较而言，在草本生产力高的地区，结合放牧进行燃料管理长期维持较低可燃物水平，更加经济合算(见表 2)。

放牧相较于机械处理和常规生物防火林带建设，具有显著的生态和经济优势。放牧能减少森林底层可燃植被，促进水文循环和植被多样性，降低火灾风险(表 2)。Cao 等[36]使用搜索词在科学网络和中国知网(1950~2019)进行了全面的搜索，从 200 个地点的 175 项现场操作研究中收集了数据。数据分析表明，放牧显著降低了地上(-38.5%)、地下(-14.7%)和总生物量(-20.6%)。

据文献报道[37]，通常的地表可燃物机械处理每公顷需 200~500 美元的处理费用，生物防火林每公顷需要 300~1500 美元的建设维护费用[38]，而放牧每公顷成本仅 300~700 美元[39]，同时还能带来数千美元经济收益(表 2)。来自美国的相关研究表明，加州地区 124,150 hm<sup>2</sup> 的牧场每年提供生态系统服务价值 9 亿~14.4 亿美元[40]，凸显低成本高效益优势。

6. 生态环境效益分析与局限性

6.1. 放牧直接关联森林和草原生态平衡

如图 3 所示，放牧作为一种传统的土地利用方式，适度放牧可控制优势种扩张，对森林和草原生态系统的植被量、植被多样性、含水率和土壤健康等方面具有重要影响。2015~2016 年间，Porensky 等对艾树(*Salvia*)大草原旱地系统进行监测，发现秋季放牧导致生物量减少了 30%~40%，春季放牧减少了 50% [15]。在内蒙古草原，轮牧加牛羊密度控制能提升 30%~40%植被覆盖和 20%~30%生物多样性[41]。牲畜粪便也可以为森林和草原提供养分，改善林区的植被结构和生态系统的稳定性，而过度放牧则可能导致

草原退化。针对内蒙古半干旱草原为期 11 年的夏季(6 月至 9 月)放牧实验证实,植物丰富度和功能多样性与放牧压力负相关,优势种和常见种丰度减少了 30%~95% [42]。这导致裸露地面的增加,显著影响生态系统过程。

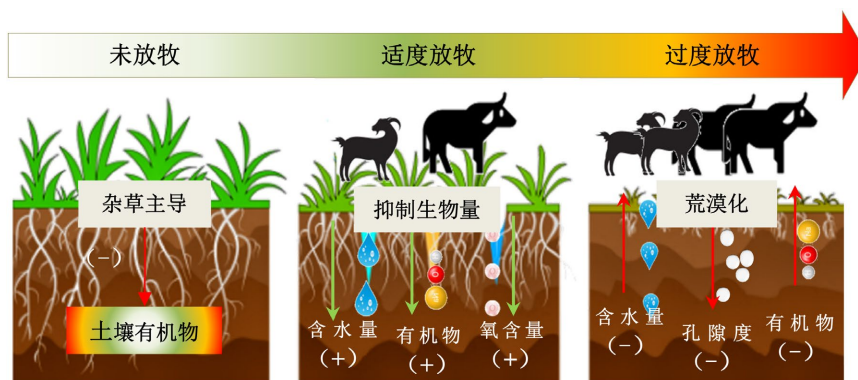


Figure 3. An illustration of the impact of grazing on the earth ecological balance

图 3. 放牧对土壤生态平衡的影响机制

放牧动物活动(踩踏、排泄及土壤翻动)会影响土壤结构和含水量。Zhao 等[43]研究了内蒙古半干旱草原放牧对土壤水分热湿状况的影响,发现放牧减少 3%~10%表层土壤大孔隙,增加 3%~6%中孔隙。过度放牧导致土壤压实,削弱了水分渗透与保持能力。Gan 等[44]对内蒙古草地的连续放牧地(1.2 只羊·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)和重度放牧地(2.0 只羊·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)进行了调查和比较,发现重度放牧使土壤含水量降低了 43%~48%,植物有效水量减少了 46%~61%。过度放牧导致土壤侵蚀和水分丧失,加剧了植被的水分竞争,抑制草本植物生长,相应降低了森林周边草本植物的含水率。

因牲畜的踩踏,过度放牧势必会导致土壤压实,限制有机物质的积累和微生物的活动,影响有机碳动态。Liu 等人[45]运用 CENTURY 模型跟踪 1970 年至 2022 年张掖草地土壤有机碳密度变化,观察到长期轻度放牧土壤有机碳降低了 1.91%,中度和重度放牧情形下则分别降低了 5.21%和 17.69%,如图 3 所示。放牧对土壤有机碳的影响会因气候和土壤类型的不同而有所差异。相对而言,针对温暖潮湿地区的放牧对土壤有机碳的影响较小。放牧以长期的方式改变土壤微生物群落及其物理结构,相应再反馈至合理放牧管理区域土壤有机碳储存和生态平衡。能否产生正面效应,在于放牧是否适度。

针对不同火险等级和生态特性,可制定相应的放牧策略。在火险等级极高且生态恢复能力强的区域(如干旱区草原),适宜采取高强度放牧、短周期轮换以及后续生态恢复的措施;对于火险等级中低且生态敏感的地区(如高原草原),则以轻度放牧结合轮牧为佳;在火险等级高且生态恢复能力中等的区域(如半干旱草原),推荐实行中度放牧与季节性放牧相结合的方案,确保防火工作的有效性与经济性达到最佳平衡。

## 6.2. 放牧强度与火险控制的阈值争议

当前研究中,关于适度放牧的量化标准存在显著争议,主要是因为不同区域、植被类型下的火险控制阈值难以统一。例如,Schachtschneider 等[25]在灌木草原生态系统研究中发现,当灌木覆盖率低于 18%时,低度至中度放牧可使火灾风险降低 30%~40%,而当灌木覆盖率超过 18%时,放牧对燃料消减的效果几乎消失,反而因灌木成为主要可燃物载体导致火灾强度陡增。这一阈值在其他区域并不适用:在针对美国俄勒冈州东南部鼠尾草和束草群落放牧研究中,Davies 等[21]发现秋季适度放牧(0.3 头牛·hm<sup>-2</sup>)仍能使外来一年生草覆盖率降低 50%,可以间接降低局部火险等级。针对中国内蒙古半干旱草原,Gan 等[44]

的研究显示,放牧反而会加剧植被干燥度,出现低放牧强度导致高火险的矛盾。这种区域性差异使得难以建立普适性的放牧强度标准,相应成为实践中政策制定的主要障碍。如图4所示,科学地放牧管理规划是一项系统工程,需考虑到诸多方面及领域。

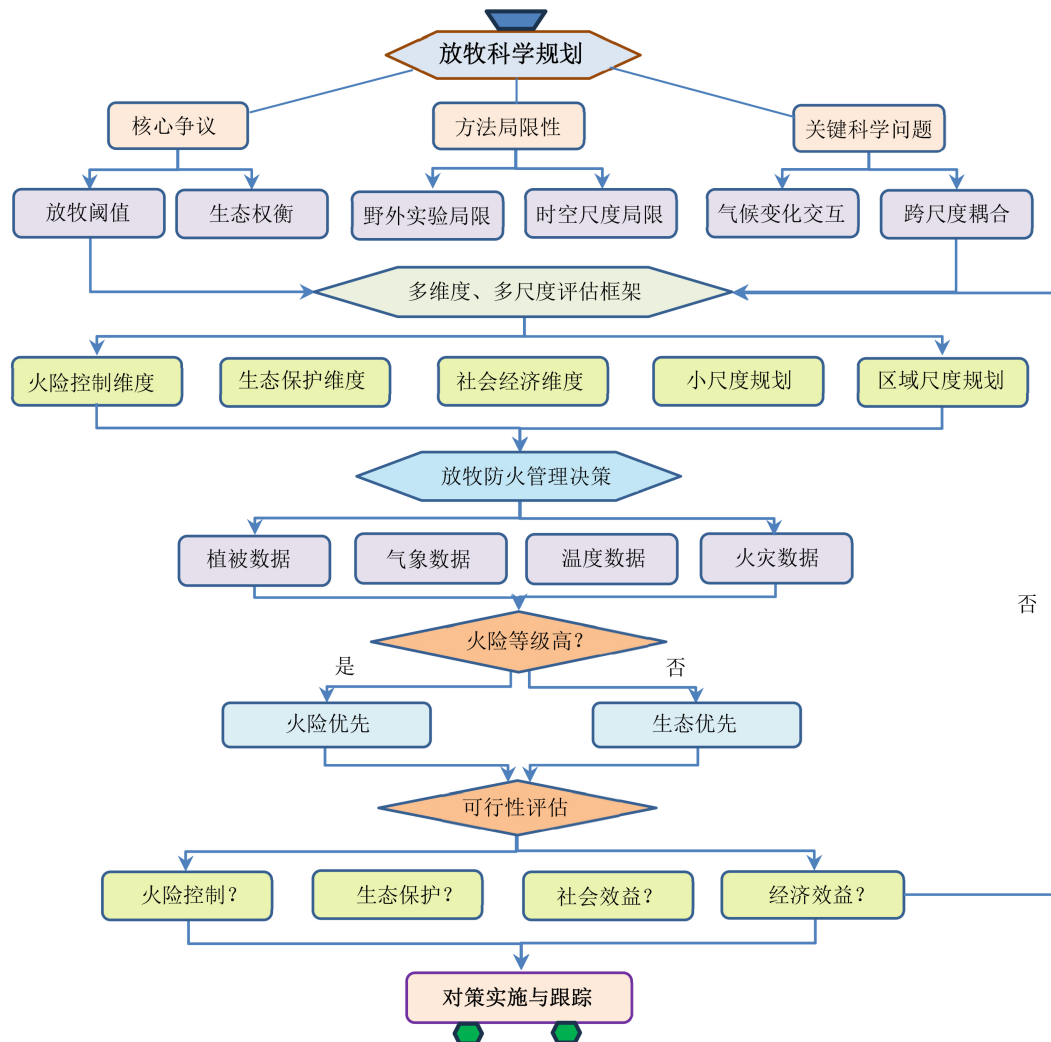


Figure 4. A flowchart of decision making for grazing management in forest fire prevention sector

图4. 放牧管理在森林防火工作中应用的决策流程

现有研究多依赖短期(3~5年)、小尺度(<100 hm<sup>2</sup>)的野外控制实验,难以反映长期、大尺度放牧对火险和生态系统的累积效应。例如,Ming等[26]在黄土高原吴起县的围栏放牧实验仅持续2年。目前尚未明确不同时空尺度下,放牧如何通过改变植被结构、土壤水文过程影响火险,且这种影响如何与气候变化(如极端干旱、高温)交互作用。例如,在小尺度(<10 hm<sup>2</sup>),牲畜踩踏可增加土壤入渗率[26],但在区域尺度(>1000 hm<sup>2</sup>),放牧导致的植被退化可能加剧水土流失,使区域干燥度提升,反而增加火险[45]。这种尺度效应的驱动机制尚未阐明,无法为大区域防火规划提供科学依据。在生态脆弱区(如高原草原、干旱区森林边缘),如何平衡放牧的防火功能与生态保护效益,仍有待进一步的探索。

图4揭示了多维度加多尺度理论的基本组元与架构。其中,火险控制维度:以植被类型、可燃物负荷到火行为参数为核心,结合区域火险等级(低/中/高/极高),确定放牧强度的初始阈值;在生态保护维度

方面,以土壤有机碳、植被多样性和土壤水文为指标,设置生态底线如土壤有机碳年损失率  $\leq 2\%$  [45]和植被覆盖率  $\geq 60\%$  [41]等,反向修正放牧强度;在社会经济维度方面,考虑放牧的经济收益与管理成本如围栏建设和牲畜管护成本等,确保方案的可行性[40]。对于小尺度( $<100 \text{ hm}^2$ )效应:侧重野外实验与模型校准,通过控制放牧频率、轮牧周期,优化局部放牧方案[12];在区域尺度( $>1000 \text{ hm}^2$ )上,则需结合遥感监测(如植被覆盖度、可燃物负荷反演)与气候模型,评估跨区域放牧的协同效应,制定宏观规划。这方面可以参考加州牧场的区域放牧管理计划等[40]。

## 7. 结论与展望

在科学的放牧策略和适度管理下,放牧是森林和草原中一种有效减少燃料的管理措施。大量试验和研究表明,轮牧、季节性放牧和定期放牧,结合合理的放牧密度,能够有效降低地表植被过度生长导致的火灾风险。放牧不仅能够维护林区植被多样性和功能,还能有效降低局部生物量,促进植被更新,并保持植被和土壤健康,改善土壤肥力和水分状况,降低火灾发生几率,消减潜在林火行为及其对环境的危害。此外,放牧可以同步提高防火宣传、火源管理与监测效率,减少火灾发生次数及其造成的损失,维护生物多样性并实现生态系统的可持续发展。生态放牧的实施需要谨慎,以避免过度放牧导致的生态平衡破坏和土壤有机碳下降。实施生态放牧需兼顾地区特性与适度原则。

面向未来,放牧的重要性日益凸显。一方面,气候变化导致的干旱加剧,使得火灾形势更加严峻,防火任务艰巨;另一方面,现有的纯消耗式防火措施不仅成本高昂,还因人力短缺而难以实施到位。适度放牧作为一种生态友好且可持续的防火策略,不仅能有效降低火灾风险,还能改善土壤肥力和水分状况,提升植被多样性和生态系统稳定性,具有显著的综合效益。未来可以在这方面展开更多的研究和技术开发,研究不同动物种类和放牧方式对植被管理效果的影响,从而优化管理方案。政策制定者在放牧管理中应考虑森林和草原防火、生态保护与经济发展的平衡。与此同时,应考虑在放牧管理中强化科学的管理措施,包括制定合理的放牧计划、实施轮牧与禁牧、提高农牧民的生态保护意识以及防火措施落实与宣传教育一体化等诸多技术细节。通过这些措施,在有效降低火灾风险的同时,实现效益的多重化和最大化。

## 基金项目

十四五期间国家重点研发计划重大自然灾害防控与公共安全专项“高强度森林火灾大尺度蔓延预测技术与系统项目”子课题(2022YFC3003000)。

## 参考文献

- [1] 李伟克,殷继艳,郭赞权,等. 2019 年世界代表性国家和地区森林火灾发生概况分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(9): 1280-1284.
- [2] 中国国家林业和草原局. 中国国家林业和草原统计年鉴 2021 [EB/OL]. <http://124.205.185.62:8080/c/www/tjnj.jhtml>, 2024-08-30.
- [3] Johnston, J.D., Olszewski, J., Miller, B., *et al.* (2021) Mechanical Thinning without Prescribed Fire Moderates Wildfire Behavior in an Eastern Oregon, USA Ponderosa Pine Forest. *Forest Ecology and Management*, **501**, Article ID: 119674. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119674>
- [4] Rabin, S.S., Gérard, F.N. and Arneith, A. (2022) The Influence of Thinning and Prescribed Burning on Future Forest Fires in Fire-Prone Regions of Europe. *Environmental Research Letters*, **17**, Article ID: 055010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6312>
- [5] Launchbaugh, K., Brammer, B., Brooks, M.L., *et al.* (2008) Interactions among Livestock Grazing, Vegetation Type, and Fire Behavior in the Murphy Wildland Fire Complex in Idaho and Nevada, July 2007: Open-File Report 2008-1214. U.S Geological Survey, 42.
- [6] Anderies, J.M., Janssen, M.A. and Walker, B.H. (2002) Grazing Management, Resilience, and the Dynamics of a Fire-

- Driven Rangeland System. *Ecosystems*, **5**, 23-44. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0053-9>
- [7] Su, R., Cheng, J., Chen, D., Bai, Y., Jin, H., Chao, L., *et al.* (2017) Effects of Grazing on Spatiotemporal Variations in Community Structure and Ecosystem Function on the Grasslands of Inner Mongolia, China. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 40. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00105-y>
- [8] 瞿琼, 刘继明. 现代林火管理技术的研究与实践[J]. 山地研究, 2019, 37(2): 234-240.
- [9] Tongway, D.J., Sparrow, A.D. and Friedel, M.H. (2003) Degradation and Recovery Processes in Arid Grazing Lands of Central Australia. Part 1: Soil and Land Resources. *Journal of Arid Environments*, **55**, 301-326. [https://doi.org/10.1016/s0140-1963\(03\)00025-9](https://doi.org/10.1016/s0140-1963(03)00025-9)
- [10] Wang, G., Li, Y., Fan, L., Ma, X., Liang, Y., Hui, T., *et al.* (2024) Assessment of Grassland Carrying Capacity Drivers and Evaluation of Pasture-Livestock Balance: A Case Study of Xinjiang, China. *Global Ecology and Conservation*, **55**, e03203. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03203>
- [11] Fuhlendorf, S.D., Townsend, D.E., Elmore, R.D. and Engle, D.M. (2010) Pyric-herbivory to Promote Rangeland Heterogeneity: Evidence from Small Mammal Communities. *Rangeland Ecology & Management*, **63**, 670-678. <https://doi.org/10.2111/rem-d-10-00044.1>
- [12] Xu, H., Zhang, J., Baoyin, T., Zhang, L. and Yuan, T. (2024) The Effects of Different Grazing Periods on the Functional Traits of *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvelev in a Typical Inner Mongolia Steppe. *Agronomy*, **14**, Article 2370. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102370>
- [13] Jacobo, E.J. and Rodríguez, A.M. (2024) Ecosystem Services of Grazed Grasslands and in the Flooding Pampa. *Phyton*, **93**, 1179-1202. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.050928>
- [14] Bhatti, M.A., Eik, L.O., Steinheim, G., Ådnøy, T., Hopkins, D.L. and Asheim, L.J. (2020) Management Strategies to Improve the Economics of Sheep Farms in Norwegian Coastal and Fjord Areas—The Effect of Animal Size and Capacities for Rangeland Utilisation. *Sustainability*, **12**, Article 3713. <https://doi.org/10.3390/su12093713>
- [15] Porensky, L.M., Perryman, B.L., Williamson, M.A., Madsen, M.D. and Leger, E.A. (2018) Combining Active Restoration and Targeted Grazing to Establish Native Plants and Reduce Fuel Loads in Invaded Ecosystems. *Ecology and Evolution*, **8**, 12533-12546. <https://doi.org/10.1002/ece3.4642>
- [16] Waters, C.M., Orgill, S.E., Melville, G.J., Toole, I.D. and Smith, W.J. (2016) Management of Grazing Intensity in the Semi-arid Rangelands of Southern Australia: Effects on Soil and Biodiversity. *Land Degradation & Development*, **28**, 1363-1375. <https://doi.org/10.1002/ldr.2602>
- [17] Masinda, M.M., Li, F., Qi, L., Sun, L. and Hu, T. (2021) Forest Fire Risk Estimation in a Typical Temperate Forest in Northeastern China Using the Canadian Forest Fire Weather Index: Case Study in Autumn 2019 and 2020. *Natural Hazards*, **111**, 1085-1101. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05054-4>
- [18] Society of Fire Protection Engineers (2023) Risk, Fire Risk, and Fire Risk Assessment. In: Society of Fire Protection Engineers, Eds., *SFPE Guide to Fire Risk Assessment*, Springer, 5-9. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17700-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17700-2_2)
- [19] Miller, D. (2006) Controlling Annual Bromes: Using Rangeland “Green-Strips” to Create Natural Fire Breaks. *Rangelands*, **28**, 22-25. [https://doi.org/10.2111/1551-501x\(2006\)28.2\[22:cab\]2.0.co;2](https://doi.org/10.2111/1551-501x(2006)28.2[22:cab]2.0.co;2)
- [20] Schlickman, E. and Milligan, B. (2022) Shepherding for Wildfire Adaptation: A Case Study of Two Grazing Management Techniques in the Mediterranean Basin. *Landscape Architecture Frontiers*, **10**, 28-39. <https://doi.org/10.15302/j-laf-1-020060>
- [21] Davies, K.W., Bates, J.D., Perryman, B. and Arispe, S. (2021) Fall-winter Grazing after Fire in Annual Grass-Invaded Sagebrush Steppe Reduced Annuals and Increased a Native Bunchgrass. *Rangeland Ecology & Management*, **77**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2021.03.001>
- [22] Siegel, K.J., Macaulay, L., Shapero, M., Becchetti, T., Larson, S., Mashiri, F.E., *et al.* (2022) Impacts of Livestock Grazing on the Probability of Burning in Wildfires Vary by Region and Vegetation Type in California. *Journal of Environmental Management*, **322**, Article ID: 116092. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116092>
- [23] Orr, D.A., Bates, J.D. and Davies, K.W. (2023) Grazing Intensity Effects on Fire Ignition Risk and Spread in Sagebrush Steppe. *Rangeland Ecology & Management*, **89**, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2022.08.004>
- [24] Zong, X., Tian, X. and Fang, L. (2022) Assessing Wildfire Risk and Mitigation Strategies in Qipanshan, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **80**, Article ID: 103237. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103237>
- [25] Schachtschneider, C.L., Strand, E.K., Launchbaugh, K.L. and Jensen, S. (2024) Targeted Cattle Grazing to Alter Fuels and Reduce Fire Behavior Metrics in Shrub-grasslands. *Rangeland Ecology & Management*, **96**, 105-116. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.05.010>
- [26] Ming, J., Zhao, Y., Ma, X., Qiao, Y. and Tantai, Y. (2024) Light Grazing Promotes Soil Water Infiltration of the Rehabilitated Grassland in the Hilly Region of the Loess Plateau. *Ecological Engineering*, **206**, Article ID: 107324. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107324>

- [27] Yagüe, M.R., Domingo-Olivé, F., Bosch-Serra, À.D., Poch, R.M. and Boixadera, J. (2016) Dairy Cattle Manure Effects on Soil Quality: Porosity, Earthworms, Aggregates and Soil Organic Carbon Fractions. *Land Degradation & Development*, **27**, 1753-1762. <https://doi.org/10.1002/ldr.2477>
- [28] Davies, K.W., Wollstein, K., Dragt, B. and O'Connor, C. (2022) Grazing Management to Reduce Wildfire Risk in Invasive Annual Grass Prone Sagebrush Communities. *Rangelands*, **44**, 194-199. <https://doi.org/10.1016/j.rala.2022.02.001>
- [29] Evans, E.W., Ellsworth, L.M. and Litton, C.M. (2015) Impact of Grazing on Fine Fuels and Potential Wildfire Behaviour in a Non-Native Tropical Grassland. *Pacific Conservation Biology*, **21**, 126-132. <https://doi.org/10.1071/pc14910>
- [30] Scholes, R.J. and Archer, S.R. (1997) Tree-grass Interactions in Savannas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **28**, 517-544. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.517>
- [31] Ahmed, A.I., Hou, L., Yan, R., Xin, X. and Zainelabdeen, Y.M. (2020) The Joint Effect of Grazing Intensity and Soil Factors on Aboveground Net Primary Production in Hulunber Grasslands Meadow Steppe. *Agriculture*, **10**, Article 263. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070263>
- [32] Mataveli, G., de Oliveira, G., Silva-Junior, C.H.L., Stark, S.C., Carvalho, N., Anderson, L.O., *et al.* (2022) Record-breaking Fires in the Brazilian Amazon Associated with Uncontrolled Deforestation. *Nature Ecology & Evolution*, **6**, 1792-1793. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01945-2>
- [33] Starns, H.D., Fuhlendorf, S.D., Elmore, R.D., Twidwell, D., Thacker, E.T., Hovick, T.J., *et al.* (2019) Recoupling Fire and Grazing Reduces Wildland Fuel Loads on Rangelands. *Ecosphere*, **10**, e02578. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2578>
- [34] Wang, H., Zhang, K., Qin, Z., Gao, W. and Wang, Z. (2024) Refining Ecological Techniques for Forest Fire Prevention and Evaluating Their Diverse Benefits. *Fire*, **7**, Article 129. <https://doi.org/10.3390/fire7040129>
- [35] Farney, B. (2023) How Much Does It Cost to Clear Land? <https://spendonhome.com/clear-land-cost/>
- [36] Cao, F., Li, W., Jiang, Y., Gan, X., Zhao, C. and Ma, J. (2024) Effects of Grazing on Grassland Biomass and Biodiversity: A Global Synthesis. *Field Crops Research*, **306**, Article ID: 109204. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109204>
- [37] Mitchell, D. and Smidt, M. (2019) Costs of Mechanical Fuel Reduction Treatments. In: Manzello, S., Ed., *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, Springer, 1-7. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_139-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_139-1)
- [38] Zong, X., Tian, X. and Wang, X. (2021) An Optimal Firebreak Design for the Boreal Forest of China. *Science of the Total Environment*, **781**, Article ID: 146822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146822>
- [39] Kauffman, J.B., Beschta, R.L., Lacy, P.M. and Liverman, M. (2023) Forum: Climate, Ecological, and Social Costs of Livestock Grazing on Western Public Lands. *Environmental Management*, **72**, 699-704. <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01853-6>
- [40] Oerly, A., Johnson, M. and Soule, J. (2022) Economic, Social, and Environmental Impacts of Cattle on Grazing Land Ecosystems. *Rangelands*, **44**, 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.rala.2021.12.003>
- [41] Hoffmann, C., Giese, M., Dickhoefer, U., Wan, H., Bai, Y., Steffens, M., *et al.* (2016) Effects of Grazing and Climate Variability on Grassland Ecosystem Functions in Inner Mongolia: Synthesis of a 6-Year Grazing Experiment. *Journal of Arid Environments*, **135**, 50-63. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.08.003>
- [42] Ren, H., Eviner, V.T., Gui, W., Wilson, G.W.T., Cobb, A.B., Yang, G., *et al.* (2018) Livestock Grazing Regulates Ecosystem Multifunctionality in Semi-Arid Grassland. *Functional Ecology*, **32**, 2790-2800. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13215>
- [43] Zhao, Y., Peth, S., Reszkowska, A., Gan, L., Krümmelbein, J., Peng, X., *et al.* (2010) Response of Soil Moisture and Temperature to Grazing Intensity in a *Leymus chinensis* Steppe, Inner Mongolia. *Plant and Soil*, **340**, 89-102. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0460-9>
- [44] Gan, L., Peng, X., Peth, S. and Horn, R. (2012) Effects of Grazing Intensity on Soil Water Regime and Flux in Inner Mongolia Grassland, China. *Pedosphere*, **22**, 165-177. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(12\)60003-4](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(12)60003-4)
- [45] Liu, Y., Zhang, M., Wang, X. and Wang, C. (2024) The Impact of Different Grazing Intensity and Management Measures on Soil Organic Carbon Density in Zhangye Grassland. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 17556. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68277-y>