

DOI: 10.20103/j.stxb.202402050313

侯扶江, 黄小娟, 常生华, 杨浩, 杨发林, 梁海红, Nogayev Adilbek, Sere Nurlan. 草地培育的内涵和方法. 生态学报, 2024, 44(19): 8897-8913.

Hou F J, Huang X J, Chang S H, Yang H, Yang F L, Liang H H, Nogayev Adilbek, Sere Nurlan. Concepts and approaches of grassland improvement. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8897-8913.

## 草地培育的内涵和方法

侯扶江<sup>1,\*</sup>, 黄小娟<sup>1</sup>, 常生华<sup>1</sup>, 杨浩<sup>3</sup>, 杨发林<sup>2</sup>, 梁海红<sup>4</sup>, NOGAYEV Adilbek<sup>5</sup>, SERE Nurlan<sup>5</sup>

1 草种创新与草地农业生态系统国家重点实验室, 农业农村部草牧业创新重点实验室, 国家林业和草原局西北退化草地生态修复与利用工程技术研究中心, 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020

2 宁夏回族自治区草原工作站, 银川 750002

3 甘肃省草原技术推广总站, 兰州 730000

4 甘南藏族自治州草原技术推广站, 甘南 747000

5 哈萨克斯坦赛福林农业技术大学, 阿斯塔纳 010011

**摘要:** 草地培育在草业科学理论指导下, 通过一系列草地管理措施, 解决草-畜供需季节性不平衡这一根本性矛盾, 提高和完善草业系统的结构与功能。根据草地培育的作用目标或其尺度与属性、实施主体有 5 种划分方法。主要包括封育、休牧、划破、补播、施肥、灌溉、火烧、放牧、人工增雨、研学旅游、智慧管理、政策法规等, 这些方法通过改变草业系统或其组分而融入草畜反馈机制。草地培育遵循产业化、慎重改造、综合性和尺度对应等原则, 集成技术之间协同或叠加, 效果达到超饱和或盈饱和, 关键是确定生态系统对培育措施的适应期、响应期和饱和期 3 组阈值。草地培育建立以放牧为基础的边牧边育的模式, 重视“有害”生物作为生态系统不可替代的组分及其资源属性, 建设以草地健康水平为基础的标准化的草地培育流程, 推动智能化、机械化、规模化作业, 提高培育效率和效益。

**关键词:** 草畜供需矛盾; 系统耦合; 草地培育类型; 放牧效应; 边牧边育; 草地培育标准化流程

## Concepts and approaches of grassland improvement

HOU Fujiang<sup>1,\*</sup>, HUANG Xiaojuan<sup>1</sup>, CHANG Shenghua<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>3</sup>, YANG Falin<sup>2</sup>, LIANG Haihong<sup>4</sup>, NOGAYEV Adilbek<sup>5</sup>, SERE Nurlan<sup>5</sup>

1 State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-Ecosystem (Lanzhou University), Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Engineering Research Center of Grassland Industry Ministry of Education, College of Pastoral Agriculture Science and Technology Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

2 Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China

3 Grassland Technique Extension Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

4 Gannan Tibetan Autonomous Prefecture Grassland Workstation, Gannan 747000, China

5 Department of Agriculture and Plant Growing, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana 010011, Kazakhstan

**Abstract:** The degradation of 60% of the world's grasslands and 70% of China's grasslands is a serious threat to sustainable socio-economic development. The current approach of "enclosure instead of improvement" blocks the natural connection between grassland and livestock and promotes the decoupling of livestock-environment-plant-human interactions. Grassland improvement is to solve the fundamental contradiction of seasonal imbalance of grass-livestock supply and demand through a

**基金项目:** 科技部对发展中国家科技援助项目 (KY202002011); 甘肃省优秀博士生项目 (23JRRA1123); 宁夏回族自治区林业和草原局重点研发计划 (2021NXLCZDYF01); 教育部创新团队发展计划项目 (IRT-17R50)

**收稿日期:** 2024-02-05; **网络出版日期:** 2024-08-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cyhoufj@lzu.edu.cn

series of management measures under the guidance of the theory of grass science, to promote the sustainable development of ecosystems and enhance the well-being of human beings. According to the target of improvement measures or their scales and attributes, there are five classification methods for the implementation of improvement measures. Main methods include enclosure, grazing, ripping, over seeding, fertilization, irrigation, fire, grazing, artificial rain enhancement, research tourism, intelligent management, policies, and regulations, etc., and the integration of grass-animal feedback mechanisms through changes in the grass system or its components. Grassland improvement follows the principles of industrialization, careful transformation, comprehensiveness, and scale correspondence, requires synergy or superimposition between integrated technologies, with effects reaching super saturation or surplus saturation. Grassland management is divided into an improvement period and a utilization period, which corresponds to the state of health of the grassland. The utilization period and improvement period of grassland always interact and constrain each other, so it is especially crucial to deal with the relationship between these two. The key to grassland improvement is to determine the thresholds of ecosystem response to the adaptation, response and saturation periods of the improvement measures. The degradation trend of grassland can be predicted in advance, and appropriate improvement measures can be taken at critical points to restore the grassland to a healthy. Ecological processes of the grassland improvement and utilization periods are not independent of each other, but are integrated and promoted. The improvement period can be reasonably utilized, while the utilization period can also be improved according to local conditions. Attaching importance to “harmful” organisms as irreplaceable components of the ecosystem and their resource properties, clarifying the ecological and economic thresholds for their prevention and control. Establish a standardized grassland improvement process based on the health level of grassland, which not only reduces the threshold of entry, but also promotes intelligent, mechanized, and large-scale operations. On the basis of the traditional improvement of “grass” and “land”, emphasis is placed on the improvement of “livestock” and its relationship with other components of the grass system, and ultimately the cultivation of the grass system is realized.

**Key Words:** contradiction between grassland supply and animal demand; system coupling; classification of grassland improvement; grazing effect; grassland improvement after grazing; standard protocol of grassland improvement

草地作为地球面积最大的陆地生态系统,与耕地、林地、水域等共同构成人类食物生产基地,同时为人类社会和其他生态系统提供环境屏障,是生产与生态兼顾的土地资源。草地贮存全球超过 30% 的土壤有机碳,同时提供 30%—50% 的畜牧产品,支撑至少 25% 的人口生计<sup>[1-2]</sup>,生产动物性食物的同时固碳是草地的典型特征之一。然而,全球草地 60% 退化,我国 70% 草地退化<sup>[3]</sup>,严重威胁人类社会经济可持续发展,世界性草地培育迫在眉睫。

草地培育始终是草业科学满足社会需求的研究前沿和热点。当前草地培育实践主要侧重于封育、补播、施肥和划破<sup>[4-6]</sup>,草原灌溉、休牧、划区轮牧相对较少<sup>[7-8]</sup>,火烧等培育措施的研究有限<sup>[9]</sup>,对放牧在草地培育的基础性作用重视不够<sup>[7]</sup>,导致研究内容缺乏系统性和综合性,生产与生态脱节,制约草地培育的效率和效益。草地培育的措施以自然科学为主,与政策、市场、基础设施建设等人类经济社会活动相关的措施较少,缺少多种产业融合技术<sup>[10]</sup>。草地培育的对象主要是退化草地,忽略了未退化草地的培育,重视牧区草地培育,忽略了农耕区、林区等<sup>[11]</sup>,难以防患于未然。草地培育忽视标准化的技术规程,准入门槛较高、成本居高不下,阻碍其智能化和全民化进程。为此,有必要分析草地培育的概念和本质,划分类型,提出原则,重新审视放牧和有害生物防治的作用,制订标准化的培育流程。

## 1 草地培育的概念和内涵

草地培育是在草业科学理论指导下,根据草地发生学规律,通过多学科交叉融合,实施一系列管理措施,推动环境-草-畜-社会系统耦合,改进草业系统的结构和功能,推动非生命循环和植物、微生物等生命循

环<sup>[12-13]</sup>,提升草地生态生产力(图 1)。草地培育的本质是草业系统的培育,基本单元是草业系统<sup>[14]</sup>。草地培育既生产独特的物质与精神产品,又维持草地健康<sup>[7-8]</sup>。

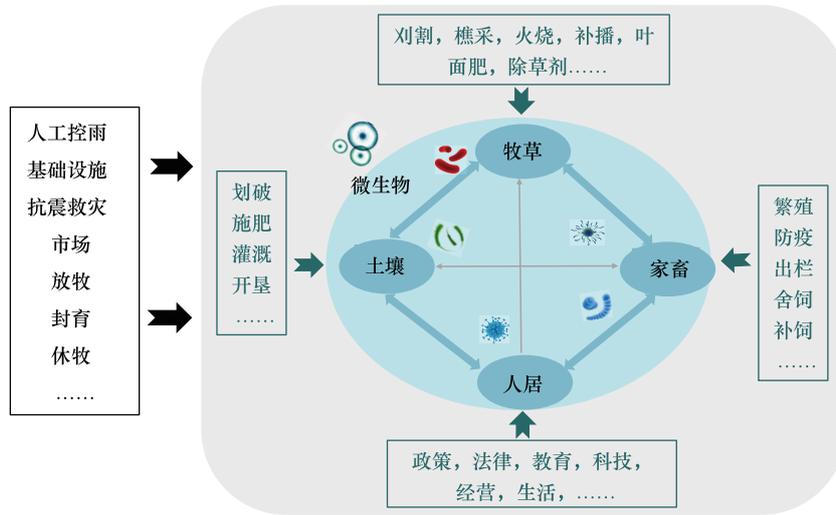


图 1 草地培育的内涵

Fig.1 Connotation of grassland improvement

一年中,气候因子如降水、热量等因季节而变化,植物生产亦随之季节性波动,存在明显的峰值和谷值,动物需求的季节性波动相对较小,导致植物-动物供需关系季节性不平衡,这是生态系统的根本性矛盾之一(图 2)。牧草在生长季赢供,在冷季或旱季亏供。亏供期,放牧家畜终日觅食、采食,难得一饱,草地放牧压力持续增大<sup>[15]</sup>。我国典型草原、高寒典型草原和荒漠草原,年亏供期为 6—8 个月,冬季草地供给最多满足家畜需求的 80%,春季则不足 40%<sup>[16]</sup>。草地管理不当加剧草畜供求矛盾,导致草-畜系统相悖,这是草地退化的根本原因(图 2)。草畜供求矛盾是绝对的,对气候等变化响应敏感,草地管理往往迟滞于草畜矛盾的变化,因而

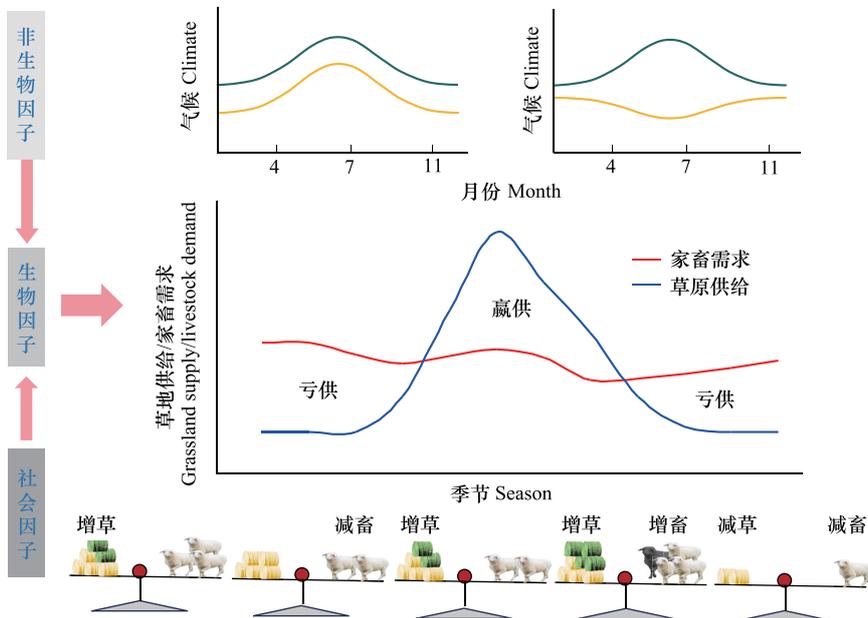


图 2 草畜供需关系及其调控

Fig.2 Relationship between grassland supply and livestock demand and its regulation

绿色草垛代表新增的草量,黄色草垛代表现有草量,黑色羊代表新增家畜,白色的羊代表现有家畜

草畜供求平衡是相对的、暂时的。草地退化的压力虽难以规避,却可通过草地培育加以调控。

草地培育的主要目标和途径是调控草-畜互动,它是草业系统发生和发展的根本驱动力之一。草畜互动沿生态系统物质和能量流动的主干存在一系列关键节点,植物与动物生产通过这些节点形成反馈机制(图3),以维持生态系统结构与功能的稳定,草地表现出对环境变化和放牧利用的抵抗力和恢复力,甚至长期过牧仍然“垂而不死”<sup>[7]</sup>。广义的草地培育即草地管理,在这些关键节点实施培育措施,事半功倍,通过草-畜反馈机制,克服系统相悖,自觉调控环境-草-畜-人居系统耦合,维持草地健康。

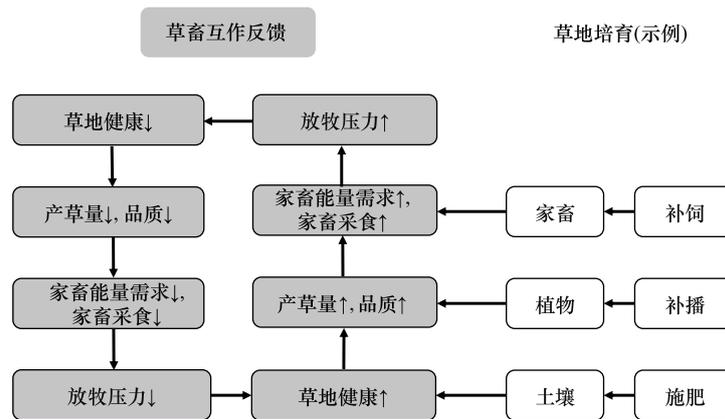


图3 草-畜互作的反馈机制

Fig.3 Feedback of grassland-animal interactions

## 2 草地培育的分类

草地培育直接作用于草业系统的组分,以牧草为直接目标的措施主要包括放牧、刈割、封育、休牧、补播、草类防控等;针对动物的培育措施主要有繁育、出栏、补饲、舍饲、疫病防控、啮齿类防控、杀虫等;微生物措施一般针对寄主实施,对家畜如乳酸菌、抗生素等,对土壤如杀菌剂、微生物肥等;施加于土壤的措施主要包括划破、开垦、灌溉、施肥等;人类管理活动主要有政策、法律法规、基础设施建设、人工控雨、文旅等(图4)。草地培育可作用于草业系统的组分,也可直接作用于整个生态系统,后者如人工控雨、研学旅游、智慧牧区建设等。

草地培育的实施主体主要包括国际组织、国家(中央政府)、各级政府、企业、各类团体、个人等。根据实施主体与作用对象联接性,分为直接和间接措施。根据草地培育直接作用的对象,分为生物因子(植物、动物、微生物等)、非生物环境因子(大气、土地、水系等)和社会因子(法律、政策、科技、生产、生活、位点等)。技术措施按直接施用的对象可以是单一组分,也可以是多组分,甚至是整个系统,人工干扰天气和社会经济发展等技术直接作用于人类-草地耦合系统(Human being-grassland coupling system, HGCS)。划分草地培育的类型,有助于快速明确实施主体、作用对象以及采取的具体技术措施(图3),从而显著提升草地管理与保护决策的科学性和施策的效率。

草地培育的生态效率可根据能量平衡或碳平衡判断。草地培育各单项技术的碳足迹和排放系数指示了该技术应用于生产实践可能引发的生态系统碳平衡效应(表1)。数项技术集成或针对某一组分的集成技术,其生态系统的碳效应可加和计测,用作草地培育的决策和评估的依据。

## 3 草地培育技术及作用

### 3.1 封育

封育(围封禁牧)是广泛使用的草地培育措施之一。它割断了草地与家畜的天然联系,导致草畜解耦,根本改变了多个时空尺度家畜与环境、牧草、人类社会的相互作用<sup>[17]</sup>,对植被和土壤产生深刻影响(表2),多用

于重度退化草地。

封育导致草地与家畜对立,甚至系统崩溃。直接风险:①家畜是生态系统营养网的关键构件,它突然消失,引发生态系统结构和功能剧烈振荡<sup>[36]</sup>,对家畜-野生动物互作、家畜-微生物互作等关键生态过程的长期影响尚不明晰<sup>[37]</sup>,增加了生态系统的不确定性;②历史上人类通过家畜管理草地,家畜发挥了“启动子”、“搬运工”和“放大器”的作用<sup>[38]</sup>,封育放弃了这种“四两拨千斤”的管理手段,事倍功半<sup>[39]</sup>;③封育多以封代育,多方面减少草地管理的投入,限制一些重要的生态服务功能<sup>[39]</sup>;④草地失去家畜及其管理活动的负反馈调节,植物生长失衡,凋落物堆积,火灾等自然风险升高<sup>[40]</sup>。间接风险:①封育迫使草地食物生产功能和社会功能萎缩或消失,生态服务压力转移到其他区域和产业,把当下生态服务压力传导给未来,在全球生态系统服务刚性需求持续增加的背景下,压力会放大并最终传导回来;②系统内各要素、草地与外部通过家畜建立的广泛的系统耦合崩溃,各种生态系统参与系统耦合的机会丧失,降低草业系统的效益。

封育的关键是适宜年限。目前围封试验多 6 a 左右,较长也小于 85 a<sup>[41]</sup>。适宜的封育年限既取决于放牧的遗留效应,也受草原类型的影响(表 3)。西班牙坎塔布连山草原,封育 5 a 表层土壤紧实度和土壤速率降低<sup>[49]</sup>;伊朗东南部草原,表层土壤 SOC、全氮(TN)、速效钾(AK)、速效磷(AP)含量与封育年限正相关<sup>[26]</sup>。我国典型草原,封育 15 a,土壤有机碳(SOC)和地上生物量(AGB)趋于稳定<sup>[50]</sup>。然而,高寒草甸,封育降低土壤容重,提高土壤 TC、TN、AN、TP 和 AP 含量<sup>[51-52]</sup>。封育效果受年降水量的影响,降水量为 250—300 mm 的生态区域,封育效果最好<sup>[53]</sup>。

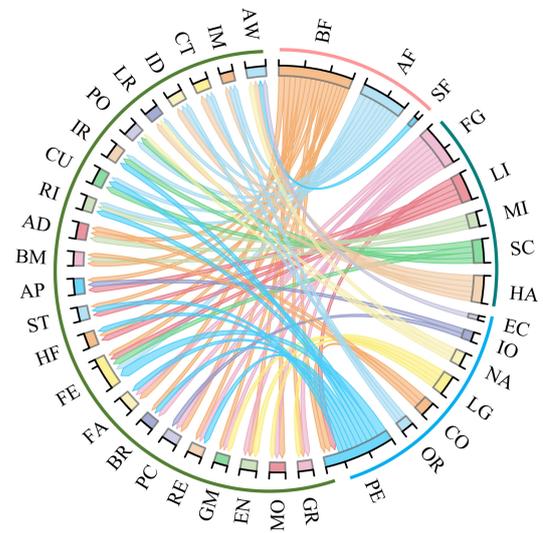


图 4 草地培育的分类

Fig.4 Classification of grassland improvement

蓝线代表培育措施,IO 国际组织 international organization, NA 国家 nations, LG 地方政府 local government, CO 企业 corporations, OR 团体 organizations, PE 个人 personal;粉线代表作用目标,AF 非生物因子 abiotic factor, SF 社会因子 social factor, BF 生物因子 biotic factor。绿线代表作用目标,包括 FG 牧草 forage, LI 家畜 livestock, MI 微生物 microbe, SO 土壤 soil, HA 人居 household, EC 生态系统 ecosystem;黄线代表实施主体,GR 放牧 grazing,MO 刈割 moving,EN 封育 enclosure,GR 休牧 grazing rest,补播 over seeding,CS 草类防控 control of grasses,RE 繁育 reproduction,FS 出栏 For sale,SU 补饲 supplementation,PF 舍饲 pen feed,FL 肥育 feedlot,AC 动物防控 animal control,PE 农药 pesticides, BM 菌肥 bacterial manure, AD 添加剂 additives, RI 划破 ripping, CU 开垦 cultivation, IR 灌溉 irrigation, FE 施肥 fertilization, PO 政策 policy, LR 法律法规 laws and regulations, CO 基础设施建设 construction, RT 研学旅游 research and tourism, IM 智慧管理 intelligent management, AW 人工干扰天气 artificial interference with the weather

表 1 草地培育技术

Table 1 Technique of grassland improvement

培育措施 Grassland improvement	集成 Integration of techniques	目标 Target	碳足迹/(kg CO <sub>2</sub> eq/kg) Carbon footprint	碳排放系数/(kg CO <sub>2</sub> /kg) Carbon emission factor
补播 Over seeding	补播+施肥+灌溉+划破+划区轮牧或刈割	增加优良牧草比例,改进草群结构	3.92	329.2
开垦 Cultivation	开垦+施肥+补播+刈割	提高优质牧草产量,降低草地放牧压力	3.90	312.8
划破 Ripping	划破+补播+施肥+灌溉+划区轮牧或刈割	改善土壤通透性,促进根茎型和根蘖型牧草更新,为其他培育措施打基础	3.89	312.6
灌溉 Irrigation	施肥+灌溉+划区轮牧或刈割	延长牧草生育期,促进繁殖更新	3.82	266.5
封育 Enclosure	封育+补播	维护牧草自然更新	2.25	7.04

续表

培育措施 Grassland improvement	集成 Integration of techniques	目标 Target	碳足迹/(kg CO <sub>2</sub> eq/kg) Carbon footprint	碳排放系数/(kg CO <sub>2</sub> /kg) Carbon emission factor
放牧 Grazing	放牧+补饲,放牧+舍饲	维持草地生物多样性、草畜系统耦合,提高草畜生产力	2.18	6.02
火烧 Flame	火烧+划区轮牧	降低草原生产力	1.91	3.23
施肥 Fertilize	灌溉+补播+划区轮牧或刈割	提高土壤肥力,加快牧草生长	1.35	0.90

表 2 封育对草原植被的影响

Table 2 Impacts of enclosure on grassland vegetation

草原类型 Grassland type	分布 Distribution	植物生长 Plant growth	物种多样性 Species diversity	地上生物量 Above-ground biomass	土壤种子库 Soil seed bank	参考文献 References
典型草原 Typical steppe	内蒙古	↑	↑	↑	↑	[18—19]
典型草原 Typical steppe	陕西	—	↑	↑	↑	[20—21]
荒漠草原 Desert steppe	内蒙古	↑	↑	↑	—	[22—23]
荒漠 Desert	蒙古	—	↑	—	—	[24]
荒漠草原 Desert steppe	宁夏	高度先↑后↓	—	先↑后↓	—	[25]
荒漠草原 Desert steppe	突尼斯	盖度↑,密度↓	↓	↓	—	[26]
荒漠 Desert	澳大利亚	—	—	—	—	[27]
高寒草甸 Alpine meadow	青海三江源	↑	↑	↑	↑	[28]
高寒典型草原 Alpine steppe	甘肃省南县	密度↓,盖度↑	↓	↑	—	[29—30]
荒漠 Desert	新疆石河子市	↑	↑	↑	—	[31]
典型草原 Typical steppe	伊朗哈马丹	部分植物密度↑	↑	—	—	[32]
稀树草原 Savanna	博茨瓦纳	—	—	↑	—	[33]
潘帕斯草原 Pampas	阿根廷	—	↑	↑	—	[34]
森林草原 Forest Steppe	蒙古	—	↑	↑	—	[35]

“↑”表示增加或促进,“↓”表示降低或抑制,“—”表示没有变化

表 3 草原适宜的封育年限

Table 3 Proper enclosure period for grassland

草原类型 Grassland type	分布区域 Distribution area	退化程度 Degradation level	适宜封育年限 Proper enclosure period/a	参考文献 References
典型草原 Typical steppe	宁夏云雾山	中度	30	[42]
荒漠草原 Desert steppe	宁夏盐池县	重度	5—7	[43]
荒漠草原 Desert steppe	蒙古	重度	7	[24]
荒漠草原 Desert steppe	突尼斯	重度	12	[26]
荒漠草原 Desert steppe	美国科罗拉多	轻度	20	[44]
荒漠草原 Desert steppe	澳大利亚	轻度	14	[27]
典型草原 Typical steppe	内蒙古锡林郭勒	重度	14	[45]
典型草原 Typical steppe	宁夏固原	中度	15	[20]
高寒草甸 Alpine meadow	青海海北州	重度	>6	[46]
高寒草甸 Alpine meadow	甘肃天祝	重度	4	[47]
高寒草甸 Alpine meadow	藏雅鲁藏布江上游	轻度	3—5	[30]
草甸 Meadow	英国威尔士	轻度	6	[30]
灌丛 Shrubland	环地中海	轻度	5	[48]

### 3.2 开垦

草地开垦后一般种植作物或林木,提高经济效益,却是世界公认的土地退化<sup>[54]</sup>。针对极度退化的草地,其他培育措施一定时期难以见效或不经济,为了加快植被和土壤恢复,不得已而开垦种草。

草原开垦的效果取决于生物、气候、土壤和土地利用方式等综合因素。全球草原开垦种树,土壤 SOC 和 TN 分别下降 6.7% 和 15%<sup>[55]</sup>。北美高草普列里,开垦破坏生物区系和土壤生物多样性<sup>[56]</sup>。欧洲,草原开垦增加碳排放、抑制生态系统物质循环和能量流动<sup>[57]</sup>;波兰西里西亚草甸草原,开垦导致土壤酸化,加剧土壤微量元素流失<sup>[58]</sup>;比利时瓦隆尼亚草原,开垦破坏土壤结构,降低土壤 SOC<sup>[59]</sup>。澳大利亚昆士兰州西南部,开垦降低草原抵抗力和恢复力<sup>[60]</sup>。我国典型草原,开垦种植多年生作物紫花苜蓿 (*Medicago sativa*), AGB 翻倍, SOC 和土壤有机氮 (SON) 提高 20% 以上,土壤碳、氮年均分别增加 0.170 t/hm<sup>2</sup> 和 0.191 t/hm<sup>2</sup>, 种树则分别减少 1.262 t/hm<sup>2</sup> 和 0.277 t/hm<sup>2</sup><sup>[61]</sup>。

### 3.3 划破

划破作为草地培育的基础措施之一,也为补播、施肥、啮齿类防治等创造条件<sup>[62-63]</sup>。草地沿等高线划破,可积蓄降水,防止形成侵蚀沟。作用主要有:①划破刺激根茎型、根蘖型等克隆植物的繁殖、生长,提高草原生产力及其稳定性。划破提升青海省退化草原 AGB 30%—50%,甚至 2—4 倍<sup>[64]</sup>;德国中部,划破增加草原生产力稳定性,6—10 a 后草原恢复到健康水平<sup>[65]</sup>。②划破增加土壤通气性和透水性,促进种子与土壤接触、吸水萌发<sup>[66]</sup>。③划破促进枯落物和动物排泄物与土壤混合而加快分解<sup>[67]</sup>。④划破改善土壤微生物生境,加快微生物的矿化作用。祁连山高寒草甸,划破增加土壤呼吸对地表温度的敏感性<sup>[68]</sup>。⑤划破在较短时间内剧烈地改变生境,控制啮齿类、小草食动物等<sup>[69]</sup>。

划破强度是关键。根据划破深度分为轻度、中度和重度划破<sup>[59]</sup>,也可根据划破间距或密度划分,或划破深度与宽度结合<sup>[6]</sup>。一般,干旱区划破浅、间距大,湿润区划破密度大、深。典型草原划破与放牧结合,划破强度 43.8%—45.7% 时群落 AGB 最高,43.7%—55.3% 时群落物种丰富度最高<sup>[6]</sup>。轻度和中度划破常用于退化草原的植被修复,维持草原的放牧功能,重度划破多用于刈牧兼用牧场,与补播、施肥相结合<sup>[8]</sup>。

### 3.4 补播

补播向草地添加植物繁殖体,以乡土草种为主,快速、定向改变草地群落结构<sup>[70]</sup>。补播可分阶段实施,先锋种迅速增加植被盖度、改善土壤条件,再顺序补播其他草类<sup>[71]</sup>。新西兰 2/3 的草地补播改良<sup>[72]</sup>,我国 20 世纪 60 年代开始有组织地补播<sup>[73]</sup>。

补播前后需划破或高强度放牧,有利于种子入土。补播多用于中度以上退化草地,适宜的草种是补播的关键(表 4)。美国怀俄明州东部,补播草木樨 (*Astragalus melilotoides*) 产草量增加 140%;青海省高寒草甸,补播分别提高植被盖度 90%、AGB 1 倍和 BGB 2 倍<sup>[70]</sup>,土壤 SOC 和 TK 含量上升,AN 含量和土壤 pH 值下降<sup>[74]</sup>;天祝高寒草甸,补播垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、无芒雀麦 (*Bromus inermis*) 和中华羊茅 (*Festuca sinensis*),群落 AGB、BGB 分别增加 144.8% 和 166%,表层土壤含水量、土壤孔隙度、土壤养分和微生物量 C、N 含量都大幅升高<sup>[75]</sup>;草甸草原补播草木樨和黄花苜蓿,AGB 和表层土壤碳储量分别增高 3.4 倍和 42.4%<sup>[76]</sup>;内蒙古呼伦贝尔草原,补播羊草 (*Leymus chinensis*) 提高禾本科牧草比例和品质<sup>[77]</sup>。黄土高原典型草原,补播紫花苜蓿、柠条锦鸡儿 (*Caragana sinica*),植被盖度分别提高 12.1% 和 9.0%,补播柠条增加 AGB 29.5%,SOC、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 显著升高<sup>[78]</sup>;宁夏荒漠草原,带状混播蒙古冰草 (*Agropyron cristatum*)、牛枝子 (*Lespedeza potaninii*)、草木樨状黄芪 (*Astragalus melilotoides*) 和沙打旺 (*Astragalus laxmannii*),植物高度、盖度和 AGB 分别提高 1.86、1.62 倍和 1.94 倍<sup>[79]</sup>。补播既是物种多样性的来源,也存在风险,草种逃逸对我国生态系统的影响需重视。

### 3.5 施肥

施肥向草地添加物质,数量与土壤营养物质相比虽然微不足道,但对草地结构功能起着“四两拨千斤”的作用,常与放牧、划破、补播、封育、开垦等结合使用。草地植物对氮敏感<sup>[80]</sup>,以氮肥或含氮复合肥为主,厩肥

为辅<sup>[81]</sup>,施肥效果存在量和时间的累积效应。经过数万年的开垦,世界草地残存于高、寒、盐、酸、旱等环境极端恶劣地区,土壤瘠薄<sup>[3]</sup>。

表 4 天然草地补播草种

Table 4 Forage species for over seeding in rangeland

草原类型 Grassland type	地点 Site	补播草种 Recommended forage species
高寒草甸 Alpine meadow	甘肃甘南州	垂穗披碱草,紫羊茅,中华羊茅,老芒茅,草地早熟禾,紫花苜蓿,小冠花,红豆草,百脉根
高寒典型草原 Alpine steppe	甘肃肃南县	垂穗披碱草,紫羊茅,草地早熟禾,异针茅,扁蓿豆,小冠花,沙打旺,红豆草
亚热带灌丛 Subtropical shrubland	云南	鸭茅,苇状羊茅,无芒雀麦,多年生黑麦草,早熟禾,非洲狗尾草,东非狼尾草,苜蓿,白三叶,百脉根,小冠花
典型草原 Typical steppe	甘肃庆阳	多年生黑麦草,垂穗披碱草,苇状羊茅,无芒雀麦,鸭茅,沙打旺,紫花苜蓿,小冠花
草甸草原 Meadow steppe	内蒙古锡林郭勒	垂穗披碱草,老芒麦,披碱草,蒙古冰草,羊草,沙打旺,紫花苜蓿,黄花苜蓿
典型草原 Typical steppe	内蒙古呼伦贝尔	扁蓿豆,黄花苜蓿,杂花苜蓿,羊草,紫花苜蓿,蒙古冰草,垂穗披碱草
荒漠草原 Desert steppe	甘肃,宁夏	蒙古冰草,牛枝子,草木樨状黄芪,沙打旺
草甸草原 Meadow steppe	吉林省长岭县	草木樨,黄花苜蓿
盐渍化草甸 Salinized meadow	新疆巴里坤县	紫花苜蓿,沙打旺,垂穗披碱草,扁穗冰草,蒙古冰草
热带稀疏草原 Savanna	埃塞俄比亚	箭筈豌豆,野豌豆,广布野豌豆
温带草原 Temperate grassland	新西兰北帕默斯顿	多年生黑麦草,凤尾草,白三叶

草原施肥的效果主要取决于:①肥料类型,通常施化肥效果快,受气候、施肥量、施肥年限的影响。科罗拉多洛基山,施氮改变植物群落组成和土壤酸碱度<sup>[82]</sup>;我国典型草原,施氮 4 a 促进密丛型禾草生长,施氮 11 a 促进根茎型禾草生长,抑制匍匐茎植物生长<sup>[84]</sup>;内蒙古荒漠草原,氮添加 12 a,冷蒿根际 AM 真菌丰富度和 AGB 显著降低,氮添加量超过 100 kg/hm<sup>2</sup>,土壤真菌  $\alpha$  多样性增加<sup>[84]</sup>;内蒙古半干旱草原,施羊粪有助于缓解土壤酸化<sup>[83]</sup>。②草地类型。德国施泰纳赫草原,施肥促进低生产力草原的植物种类和土壤酸化<sup>[85]</sup>;青藏高原高寒草甸,施肥显著提高物种丰富度,降低 SOC,草原由碳汇转为碳源<sup>[86]</sup>。③草地利用方式,施肥与放牧、刈割组合使用,培育效果更显著。全球草原,放牧削弱施肥对土壤种子库的负作用<sup>[87]</sup>;加拿大草地,连续 3 a 施复合肥导致根和 AGB 分别提高 37% 和 23%,与放牧互作促进地下部的生长<sup>[88]</sup>。

### 3.6 灌溉

草地物质主要通过水分运输和转化,灌溉的作用广泛而深刻<sup>[89]</sup>。①灌溉改变草地水分的时空格局,促进土壤种子库萌发,增加群落物种丰富度并提高群落稳定性,常与划破、补播、施肥等结合使用<sup>[90]</sup>。内蒙古希拉穆仁草原,灌溉提高建群种高度、植被盖度和 AGB,提高表层土壤肥力,促进土壤种子库的萌发<sup>[91]</sup>;藏北草原,灌溉增加群落中常见物种数和均匀度指数,提高群落多样性和稳定性<sup>[92]</sup>;内蒙古锡林浩特毛登牧场,灌溉与施肥组合提高 AGB 33.73%<sup>[93]</sup>。②灌溉增加土壤水分和养分含量,促进水肥耦合,加强土-草互作。新西兰草地,灌溉降低土壤 C、N 储量<sup>[94]</sup>,增加牧草产量<sup>[95]</sup>;美国怀俄明州,灌溉改变草地群落物种组成和结构,促进 C、N、P、S 循环相关功能基因的表达和土-草互作<sup>[96]</sup>。③滴漫灌溉(Infiltrating irrigation),社会发展为滴漫灌溉提供了新的历史机遇,以生态促生产。中欧和北疆,滴漫灌溉改变草地物种组成,维护群落生物多样性,改善土壤结构<sup>[97]</sup>。

### 3.7 火烧

火烧是历史悠久的草地培育措施,主要用在降水较充分、植物生长快、易粗老,或者草地整体“赢供”但优质牧草“亏供”的地区。

火烧对草地的影响全面而深刻。①火烧促进植物对光照、水分和养分资源的竞争,改变群落结构。南达科他州格兰德河混合普列里火烧后 1—2 a,牧草产量下降而品质改善,多年生牧草减少,一年生牧草增多<sup>[98]</sup>;

黄土高原典型草原,火烧促进克隆植物密度增加<sup>[4]</sup>。②火烧灰烬保持土壤水分,提高土壤矿质养分,促进牧草的繁殖更新<sup>[99]</sup>。印度东北部,草原火烧降低 SOC、TN 和 AP 含量;黄土高原典型草原,火烧增加 SOC、土壤 TN、TP 和 AK 含量<sup>[100]</sup>。波罗的海东岸,春季火烧降低土壤 pH、Al<sup>3+</sup> 和 Mn<sup>2+</sup>,提升土壤电导率、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 K<sup>+</sup> 含量<sup>[101]</sup>;北美大平原,火烧破除种子入土和萌发时枯落物对光的阻碍<sup>[102]</sup>;加利福尼亚南部,火烧增加野燕麦 (*Avena fatua*) 繁殖力<sup>[103]</sup>。③火烧在短期内增加地表对太阳辐射的吸收,提高土壤表层温度,促进一些植物返青和生长<sup>[98]</sup>。④火烧灭除土壤表层微生物、动物和植物,一定程度上重塑土-草-动物-微生物互作网<sup>[99]</sup>。⑤火烧与其他草地培育结合,效应增强。环地中海地区,火烧提高草原 AGB 和植被盖度,与施肥结合增加物种多样性和土壤 pH 值,加速淋溶<sup>[104]</sup>;青藏高原高寒草甸,封育和冬季火烧提高牧草中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量,短期内提升牧草产量和品质,加快草地恢复<sup>[105]</sup>。

### 3.8 放牧

放牧是最经济、最广泛的草地管理方式。它维持或提高草地物种多样性和产草量,是草地生态修复与健康管理的基石<sup>[38]</sup>。

“激素效应”。①家畜唾液、排放的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 等刺激植物愈伤、生长和繁殖,作用如同生长素和细胞分裂素等<sup>[106]</sup>。②家畜采食和践踏刺激植物生长、分蘖、分株,与赤霉素等效<sup>[7]</sup>。③家畜采食植物幼嫩部分产生“去顶”效应,促进植物匍匐生长、植株矮化等,类似腐胺的作用<sup>[107]</sup>。④动物采食过程中,分泌物以内吞的方式进入植物细胞,调控植物防御,影响植物生长<sup>[106]</sup>。

“收获效应”,或去除效应、采摘效应。①家畜采食改善冠层微气候,增加饱和蒸汽压、光照、相对湿度和风速,加快光合作用和冠层重建,促进牧草再生长<sup>[108]</sup>。②家畜采食减少 AGB,单位生物量获取的资源增加,改善草地源库效应<sup>[109]</sup>。③家畜采食成熟器官和组织,增加幼嫩器官和组织的比例,促进光合作用<sup>[7]</sup>。

“施肥效应”。①家畜将尿和粪均匀地返施于草地,尿在 3 个月内、粪在半年—2 a 为土壤施加养分<sup>[110]</sup>。②家畜归圈补饲,通过广泛的系统耦合,在草地与耕地、林地、水域等其他生态系统之间搬运厩肥。③家畜针对性地补饲微量元素,通过家畜排泄物施于草地。④家畜排放的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 可作为草地的“气肥”,促进草地 AGB 的增加。⑤施菌肥,家畜消化系统和体表微生物通过采食、排泄物等在环境、草、畜之间传播、扩散、循环,促进土壤生态过程和植物生长<sup>[15]</sup>。

“补播效应”。①给放牧家畜饲喂特定牧草的种子,这些种子经过家畜消化道打破休眠,以粪种子库的形式均匀“补播”于草地,促进萌发,提高草地物种多样性和匀质性,小尺度上导致草地斑块化<sup>[111]</sup>。美国德克萨斯州,奶牛可补播柳枝稷种子<sup>[112]</sup>;犹他州,奶牛补播穗序冰草 (*Agropyron cristatum*) 和早熟禾 (*Poa annua*) 种子<sup>[113]</sup>;祁连山南坡高寒草甸,放牧家畜通过排泄物补播植物种子<sup>[112]</sup>;天山北坡,绵羊放牧补播禾本科和豆科植物种子,促进荒漠修复<sup>[114]</sup>。②家畜体表和消化道传播牧草种子,全球 >50% 的植物可通过动物传播种子,35% 通过消化道传播,20% 通过体表传播,牛毛粘附种子传播 1 km,绵羊 >8% 的种子粘附时间超过 40 d,传播距离超过 100 km<sup>[106]</sup>。西班牙西南地区,山羊传播灌木种子<sup>[115]</sup>。③草原补播后,放牧践踏促进种子与土壤接触、种子萌发和幼苗生长<sup>[70-79]</sup>。

“灌溉效应”。①家畜通过尿液将水从水源排放在草地,导致小尺度草地斑块化<sup>[116]</sup>。②家畜采食植物冠层,降低蒸腾作用,并通过植物水分的再利用、降水在冠层再分配,提高植被和生态系统水分利用效率<sup>[117]</sup>。③家畜在坡地放牧,践踏路径沿等高线分布,形成“小梯田”或“小鱼鳞坑”,拦蓄降雨,阻滞水土流失,促进水分下渗。

“蹄耕效应”。①干旱时,家畜践踏疏松表土,促进降水下渗,切断毛细管结构,抑制降水蒸发<sup>[7]</sup>。②土壤含水量较高时,家畜践踏提高表土紧实度,减少水分下渗,增加地表径流,提高土壤透气性。③家畜践踏破碎生草土层和生物结皮,增加降雨下渗,促进种子落土和萌发<sup>[6]</sup>。④家畜践踏加速凋落物和粪进入土壤,促进分解<sup>[111]</sup>。

“自适应效应”。①家畜选择性采食导致群落中适口性较好的牧草比例降低,适口性较差、粗老、家畜不

喜食的功能性乡土草(Functional native herbage FNH)占比增加,家畜减少对该区域的采食,有利于草地恢复。  
 ②持续放牧导致家畜得不到充足的营养,家畜体况下降,弱畜甚至死亡,客观上降低草地的放牧压力,使得草畜供求关系向平衡方向发展<sup>[8]</sup>。  
 ③放牧加强地上-地下反馈、微生物循环等,增强生态系统稳定性<sup>[118]</sup>。

“生物多样性效应”。①多种放牧制度和放牧强度在一系列空间尺度上构成生物多样性的驱动力,包括生态系统多样性、景观多样性<sup>[119]</sup>。  
 ②放牧区(Paddock)对周边区域起到既分隔又联接的作用,形成多样的、特征明显的环境-植物-动物-微生物的互作格局,是维持生物多样性的景观基础<sup>[120]</sup>。

草地培育可视为放牧的“仿生学”。

### 3.9 其他

刈牧兼用将草地划分若干区域,以轮牧为主,每个区域在数年中有计划地轮流刈割,或在草地赢供期收贮牧草,促使草地更新,防止过度放牧或牧草变粗老<sup>[121]</sup>。补饲通过向放牧家畜定量饲喂特定的物质,引导非生命物质和生命物质在环境-草-畜-人之间有序流动,实现家畜生产、草地管理、草业系统结构与功能调控等特定目标<sup>[122]</sup>(图3)。“左邻右舍”工程,农牧户分工协作,植物农场与动物农场相互供草与供(厩)肥,牧草就地就近转化,家畜排泄物就地就近返还耕地、草地、林地等生态系统,形成循环农业<sup>[38]</sup>。“农草济牧”工程是农牧区之间通过政策支持,农区种草输送到牧区,解决牧区草畜供求矛盾,空间大尺度的农牧耦合<sup>[38]</sup>。河西走廊绿洲种植牧草支持祁连山区和阿拉善荒漠的草地合理放牧,形成山地-荒漠-绿洲耦合系统(MODS),种植系统和放牧系统经济效益分别增加51%和334%<sup>[38]</sup>。青藏高原及周边的四川盆地、黄土高原、河西走廊等一系列农耕区为供草基地,500 km 半径范围(早发夕至)覆盖90%的高寒牧区<sup>[120]</sup>,目前每年数以万吨的草产品输入高寒牧区。

草地培育的政策性措施作用于整个草业系统,包括生态补偿、草畜供需平衡调节、草原牧区现代化转型等<sup>[123]</sup>。我国《草原法》鼓励对草原保护、恢复、资源使用和损害经济补偿<sup>[124]</sup>。2010年,我国开始实施草原生态奖补机制,对禁牧和草畜供需平衡的农牧户经济直补<sup>[124]</sup>。草原牧区现代化转型促使牧区从靠天养畜的传统模式跨入科技密集型的新质草业时代<sup>[123]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 草地培育的原则

草地培育遵循草业科学的理论,以人为本,发展和完善草业系统的结构与功能,促进土-草-畜-人的系统耦合。  
 ①产业化,既是草地培育可持续性的动力,也是首要目标,贯穿草地培育的始终。  
 ②慎重改造,草地培育尊重草地利用与管理的历史,避免盲目抹除“落后”的历史痕迹,造成草地自然资源和社会资源及其关系的二次破坏。  
 ③综合性,因地制宜地确定技术模式,一种或数种培育技术为主,各项措施集成,实现整体最优的目标。

草地表现在草地培育梯度的变化分为适应期、响应期和稳定期(图5);根据适应期和稳定期的草地表现的关系,可以分为超饱和(a)、盈饱和(b)、等饱和(c)和亏饱和(d)<sup>[125]</sup>;草地培育的效果则是各种技术引发的草地的综合表现,主要有协同、拮抗和叠加等。草地培育综合性原则要求技术集成需关注其效应协同或叠加,避免拮抗,培育效果坚决避免亏饱和、尽可能达到超饱和,确定适应点、最优点和饱和点3对阈值是关键。

④尺度对应,草地培育的规划、实施充分考虑各项技术或各实施主体与实施区域、时间在尺度上一一对

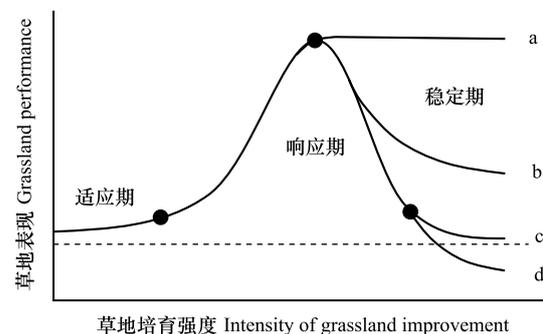


图5 草地表现随草地培育的变化  
 Fig.5 Response of grassland performance to grassland improvement  
 a、b、c、d 分别代表草地表现随草地培育强度变化表现出的超饱和、盈饱和、等饱和和亏饱和曲线

应,时空上精准定策、施策、评价和反馈(图 6)。草地培育常常面对各种时空尺度的自然问题和社会问题,涵盖多种生态系统,需要以流域为最小面积建立决策与施策——对应的工作机制,跨行政区域或行政部门协同。草地培育措施的时空格局具多样性(图 5),技术集成需关注其效应互惠或叠加。

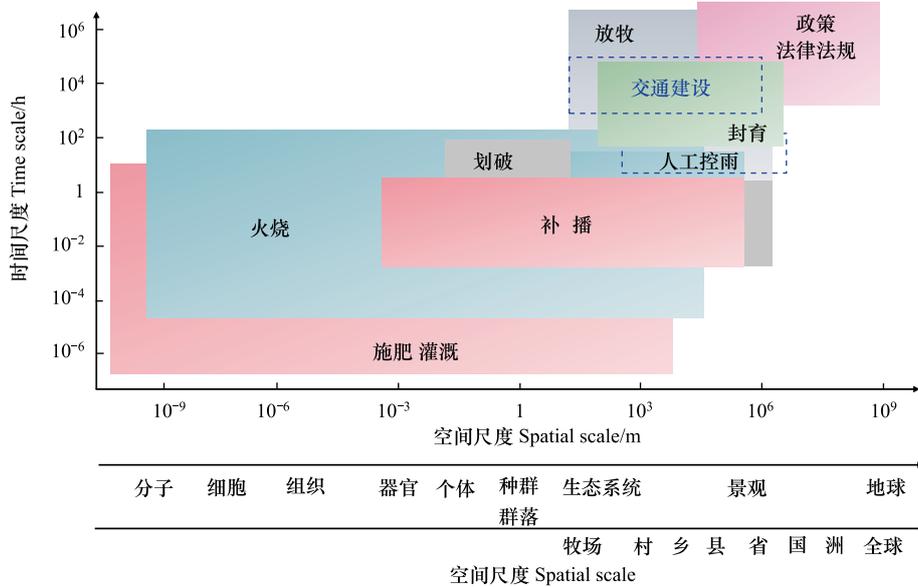


图 6 草地培育的尺度效应

Fig.6 Scaling effects of grassland improvement

### 4.2 放牧是草地培育的基础

草地面积广大,人管畜、人和畜共同管草才能高效地实现目标。放牧促进环境-草-畜-人的系统耦合,提高草地生态系统多功能性,生态与生产兼顾。未退化的草地,全年合理放牧,关键是载畜量适宜;轻度退化草地,全年划区轮牧,生长季要密(高密度)、快(短期)放牧;中度退化草地,划区轮牧和培育措施结合,生长季休牧;严重退化的草地,培育为主,短期封育与生长季休牧相结合,直到完全修复(图 7)。

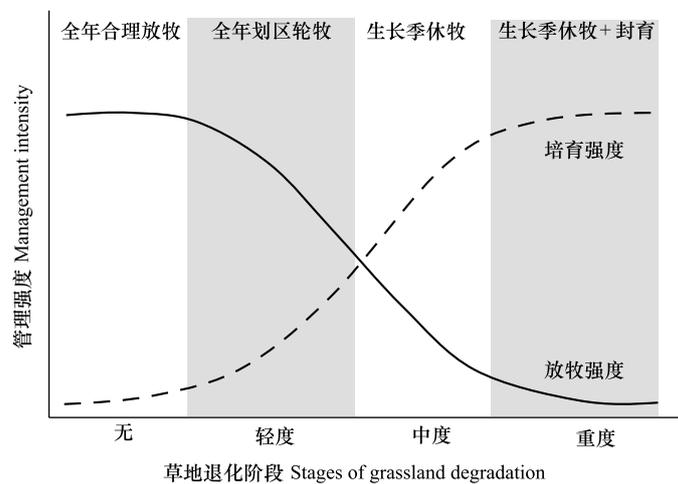


图 7 草原退化阶段与草地培育的关系(改自王迎新等,2020)

Fig.7 Relationship between grassland degradation and grassland improvement (adaption from Wang et al,2020)

草地在自然因子、社会因子和生物因子的共同作用下发生发展,其退化亦是如此<sup>[128]</sup>。历史上,草地总是利用与培育交互罔替,人类自发或自觉的草地培育是对草地健康的响应,却总是迟滞于草地健康的变化,草地

不可避免地时常濒临退化的边缘、甚至退化,这是绝对的,草地健康是相对的,因此,草地健康的预测、预警至关重要<sup>[129]</sup>(图8)。<sup>①</sup>草地管理分为培育期(Improvement period, IP)和利用期(Utilization period, UP),对应着草地的健康状态。<sup>②</sup>草地利用期即便合理利用,气候、社会等因素的不确定性也会威胁草地健康,需提前预判其退化,并在关键节点(图8 B, C)采取适当的培育措施,对于濒临崩溃的草地,从培育和维持的产投比、技术难度、社会效益等综合分析,宜开垦种草,加快草地植被和土壤修复(图8 D)。<sup>③</sup>草地培育期,各种培育措施促使草地恢复到健康状态。<sup>④</sup>任一草地总是处于利用期或培育期,处理好两者关系尤为关键。

草地在培育期和利用期的生态过程中并非相互独立,反而是相互融合与促进。培育期可以合理利用,利用期亦可因地制宜培育,即边牧边育或轮牧轮育,需根据培育期和利用期的关系校正载畜量(Carrying capability, CC)和放牧率(Stocking rate, SR)等多种时空尺度的草地管理参数。载畜量是指在一定时间周期内,单位草地面积(Grassland area, GA)所能容纳的放牧家畜数量(Livestock number, LN),时间一般是一个生产周期,多以年计,也可根据实际情况设定周期,通常在一个行政单元或草地管理单元的基础上进行:

$$CC = \frac{LN}{GA}$$

一个管理周期,牧场总有一定面积的草地休牧或封育,因此根据这一时期实际放牧利用的草地面积,即利用期的草地面积测算 CC。

$$CC = \left(1 - \frac{UP}{IP+UP}\right) \times \frac{LN}{GA} = \frac{1}{1 + \frac{IP}{UP}} \times \frac{LN}{GA}$$

确定适宜的草地利用和培育的面积比例(Ratio of utilization to improvement of grassland  $U/I$  值),扭转重利用轻培育或利用与培育对立的观念,避免草地过度利用或利用不充分,可根据草地适宜封育年限(表3)、降水等重要气候因子的变化周期,同时参考草地生产规划、市场风险周期等。一般,高寒草甸和典型草原的培育期是2—3 a,草原牧区气候和草地生产力变化的周期约6—11 a<sup>[126]</sup>,草地利用期约为培育期的3—5倍,各类草地根据实际情况可确定草地  $U/I$  值。对于轮牧轮育牧场,每年新培育的草地面积为适宜  $U/I$  值的  $1/n$  ( $n$  为适宜培育年限),也可根据草地健康状况采用动态的  $U/I$  值。预测、准确判断草地健康的变化趋势,并定期实施一定的培育措施,尤其是利用放牧效应开展培育,常常事半功倍。

#### 4.3 草地培育与“有害”生物防治

传统认为,啮齿类、毒害草、病虫等“有害”生物是草地退化的原因和标志。本质上,它们多是生态系统不可或缺的组分,对生态系统结构与功能具有不可替代的作用,也是草地因管理不当而退化的“受害者”,可控而不可灭。毒害草本质上是 FNH,它们与家畜喜食的传统牧草共同构成草原生产力和生物多样性<sup>[127]</sup>,啮齿类和昆虫、微生物概莫能外。草地培育既要关注其数量超越阈值对生产的负面作用,也要重视其资源属性,尤其是维持生态系统健康、增加碳汇、提升家畜生产力等方面的功能<sup>[66]</sup>。过去草地培育欲根除而后快,却常常事倍功半,这是生态系统“庇护”的结果。草地培育要给予“有害”生物生态系统“公民”待遇,明确其防控的生态经济阈值,趋利避害、变害为宝。对于草原新增物种,也要评估其对生态系统物种多样性和服务功能的长期效应,我国南方白三叶和北方紫花苜蓿的扩散值得关注。

#### 4.4 草地培育的标准化流程

草地培育建立标准化的流程,既能降低准入门槛,倡行“全民”培育,又可精准施策、提高效率。首先,评

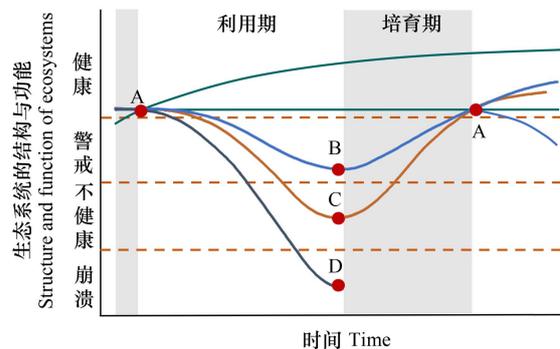


图8 草地培育和草地利用的关系

Fig.8 Relationship between grassland improvement and grassland utilization

A: 从培育期逐渐进入利用期; B、C、D: 采取关键培育措施, 从利用其逐渐进入培育期

估退化草地。其次,定量退化草地阶段,制定针对性的培育措施。轻度退化草地,全年合理放牧;中度退化草地,生长季休牧、划破、补播和全年合理放牧相结合;重度退化草地,采取适度禁牧、生长季休牧、全年合理放牧与划破、补播、施肥、灌溉等组合措施。极度退化的草地,草原结构和功能趋于崩溃,传统的培育措施不再经济有效,开垦种草,建立生态生产耦合更强的栽培草地,加快土壤与植被恢复(图 8)。

人类管理不当,加剧草-畜供需矛盾,导致草-畜系统相悖,引发草地退化的风险直至草地退化,既不能因科技进步而过度培育,也不能因过度担忧而盲目培育,把草地利用期与培育期的面积比例控制在合理阈值。草地培育建立标准化流程,推动机械化、智能化、规模化作业,方便一家一户在草地退化的斑块上打“补丁”(图 9),这既是草地培育产业化的需要,也是草地管理可持续的基础。

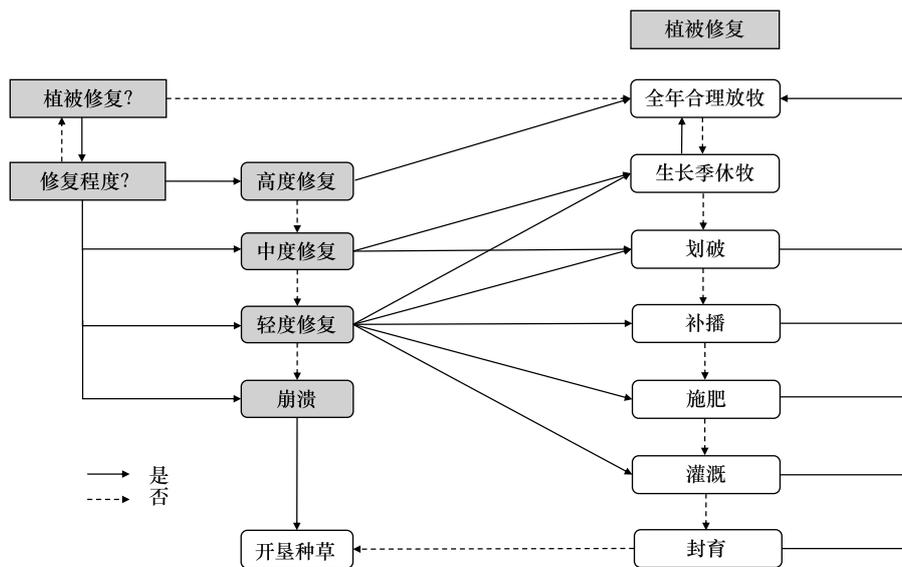


图 9 草地培育流程图

Fig.9 Process of the grassland improvement

### 4.5 展望

草地培育在长期实践中得到了广泛检验和持续改进,依托大数据、机器学习,构建标准化作业平台尤为迫切,包括全球和区域性大数据分析系统,涵盖气候、土壤、地形、植物、动物、微生物、政策、科技、生活和草地管理历史等多源数据。人工智能通过对草地管理数据库的分析,实现草地培育精、准、快决策。草地培育根据标准化流程智能化作业,人机协同,确保工作效率和效益。

草地培育是草业保障国家食物安全、生态安全和农牧区社会发展的基础,需要持续创新理论和技术模式并产业化应用,主要包括草种繁育、生产、使用一体化的草类种质资源创新与利用、以草畜耦合为目标的牧草优质高产栽培与转化、生态生产力修复与维持的半栽培草地管理和草地有害生物管理与利用、以智能化、自动化、规模化特征的草业系统耦合与管理等。

### 5 结论

草-畜(植物-动物)供需季节性不平衡是生态系统的根本性矛盾,草地管理不当加剧草畜供需矛盾,导致草-畜系统相悖,这是草地退化的根本原因。草地培育在发展草-畜系统耦合的基础上,推动土(环境)-草-畜-人居的系统耦合,完善草业系统的结构与功能。草地培育技术依托大数据和智能化,实现精准决策和自动化作业,在传统的培育“草”和“地”的基础上,重视“畜”及其与其他组分关系的培育,最终达到草业系统的培育。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Chen Y, Feng X, Fu B, Ma H, Zohner C M, Crowther T W, Huang Y, Wu X, Wei F. Maps with 1 km resolution reveal increases in above-and belowground forest biomass carbon pools in China over the past 20 years. *Earth System Science Data*, 2023, 15(2): 897-910.
- [ 2 ] 白永飞, 赵玉金, 王扬, 周楷玲. 中国北方草地生态系统服务评估和功能分区助力生态安全屏障建设. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 675-689.
- [ 3 ] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, Fry E L, Johnson D, Lavelle J M, Le Provost G, Luo S, Png K, Sankaran M, Hou X Y, Zhou H K, Ma L, Ren W B, Li X L, Ding Y, Li Y H, Shi H X. Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10): 720-735.
- [ 4 ] 张胜男, 闫德仁, 黄海广, 胡小龙. 短期封育对科尔沁沙地榆树疏林土壤微生物群落结构的影响. *生态学杂志*, 2020, 39(9): 2860-2867.
- [ 5 ] Hu A, Zhang J, Chen X J, Millner J P, Chang S H, Bowatte S, Hou F J. The composition, richness, and evenness of seedlings from the soil seed bank of a semi-arid steppe in Northern China are affected by long-term stocking rates of sheep and rainfall variation. *The Rangeland Journal*, 2019, 41(1): 23.
- [ 6 ] 李琪琪, 黄小娟, 李岚, 常生华, 侯扶江. 黄土高原典型草原群落结构和土壤水分对划破的响应. *生态学报*, 2023, 43(15): 6131-6142.
- [ 7 ] 侯扶江, 杨中艺. 放牧对草地的作用. *生态学报*, 2006, 26(1): 244-264.
- [ 8 ] Hou F J, Jia Q M, Lou S N, Yang C T, Ning J, Li L, Fan Q S. Grassland agriculture in china—a review. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2021, 8(1): 35.
- [ 9 ] Freitag M, Kamp J, Dara A, Kuemmerle T, Sidorova T V, Stürnemann I A, Velbert F, Hölzel N. Post - soviet shifts in grazing and fire regimes changed the functional plant composition on the Eurasian steppe. *Global Change Biology*, 2021, 27(2): 388-401.
- [ 10 ] Bogner P, Zechmeister-Boltenstern S, Schinner F. Carbon balance of managed grasslands: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 213, 134-145.
- [ 11 ] Batjavlin A, Tsybulnikov A, Gubin D. The impact of grazing management on the structure and function of steppe ecosystems. *Russian Journal of Ecosystemology*, 2019, 15(2), 145-157.
- [ 12 ] Fan Q S, Xie K L, Cui X X, Zhang G Y, Zheng H Z, Chang S H, Hou F J. Microecosystem of yak rumen on the Qinghai - Tibetan Plateau is stable and is unaffected by soil or grass microbiota. *Environmental Microbiology*, 2022, 24(12): 5760-5773.
- [ 13 ] Wang S L, Hou F J. Higher dung seedling density increases livestock dung greenhouse gas emissions in an alpine meadow. *Journal of Applied Ecology*, 2023, 60(10): 2144-2153.
- [ 14 ] 任继周, 李向林, 侯扶江. 草地农业生态学研究进展与趋势. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1017-1021.
- [ 15 ] 任继周, 侯扶江, 胥刚. 放牧管理的现代化转型—我国亟待补上的一课. *草业科学*, 2011, 28(10): 1745-1754.
- [ 16 ] 任继周, 方锡良, 侯扶江. 论农业界面的伦理学涵义. *自然辩证法通讯*, 2018, 40(6): 1-9.
- [ 17 ] Dalgaard T, Haugaard S. Energy use in the production of animal-source foods: status, trends, drivers, and opportunities to reduce energy use in developing and developed countries. *Global Food Security*, 2017, 11, 1-11.
- [ 18 ] Bi X, Li B, Fu Q, Fan Y, Ma L X, Yang Z H, Nan B, Dai X H, Zhang X S. Effects of grazing exclusion on the grassland ecosystems of mountain meadows and temperate typical steppe in a mountain-basin system in Central Asia's arid regions, China. *The Science of the Total Environment*, 2018, 630: 254-263.
- [ 19 ] Zhang J H, Huang Y M, Chen H Y, Gong J R, Qi Y, Li E G, Wu X C. Response of plant functional traits at species and community levels to grazing exclusion on Inner Mongolian steppe, China. *The Rangeland Journal*, 2018, 40(2): 179.
- [ 20 ] 赵凌平, 白欣, 谭世图, 樊文娜, 王占彬, 王清义. 不同年限封育对黄土高原典型草原地上植被的影响. *草业科学*, 2018, 35(1): 27-35.
- [ 21 ] 何晴波, 赵凌平, 白欣, 崔伟. 封育和放牧对典型草原地上植被的影响. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 247-251, 258.
- [ 22 ] 王悦骅, 宋晓辉, 王占文, 康静, 韩国栋, 王忠武. 植物群落多样性和生产力对不同载畜率的响应. *中国草地学报*, 2018, 40(6): 107-112.
- [ 23 ] 刘娜, 白可喻, 杨云卉, 张睿洋, 韩国栋. 放牧对内蒙古荒漠草原草地植被及土壤养分的影响. *草业科学*, 2018, 35(6): 1323-1331.
- [ 24 ] Feyisa K, Beyene S, Angassa A, Said M Y, de Leeuw J, Abebe A, Megersa B. Effects of enclosure management on carbon sequestration, soil properties and vegetation attributes in East African rangelands. *Catena*, 2017, 159: 9-19.
- [ 25 ] 陶利波, 于双, 王国会, 高晓荣, 许冬梅. 封育对宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落特征及其稳定性的影响. *中国草地学报*, 2018, 40(2): 67-74.
- [ 26 ] Abdallah F, Chaieb M. Changes in vegetation proprieties under short- and long-term protection in North African arid land. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5(7): 899-906.
- [ 27 ] Fensham R J, Donald S, Dwyer J M. Propagule pressure, not fire or cattle grazing, promotes invasion of buffel grass *Cenchrus ciliaris*. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50(1): 138-146.
- [ 28 ] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 祁栋林, 王力, 傅华. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响. *草业科学*, 2015, 32(1): 11-18.
- [ 29 ] Yao X X, Wu J P, Gong X Y, Lang X, Wang C L, Song S Z, Ali Ahmad A. Effects of long term fencing on biomass, coverage, density, biodiversity and nutritional values of vegetation community in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering*, 2019, 130: 80-93.
- [ 30 ] 屈兴乐, 方江平. 围栏封育对退化灌丛草地群落土壤特性和植被的影响. *北方园艺*, 2019, (3): 109-115.
- [ 31 ] 江沙沙, 孙宗玖, 杨静, 董乙强. 封育年限对伊犁绢蒿荒漠草地群落种间关系及稳定性的影响. *中国草地学报*, 2018, 40(3): 68-75.

- [32] Asadian G, Javadi S A, Jafary M, Arzani H, Akbarzade M. Relationships between environmental factors and plant communities in enclosure rangelands (case study: gonbad, Hamadan). *Journal of Rangeland Science*, 2016, 7(1): 20-34.
- [33] Mugabe W, Moatswi B, Nsinamwa M, Akanyang L, Dipheko K, Matthews N, Nazar M, Ia S, Shuaib M, Aa S. Dry matter biomass productivity and composition of grasses along grazing gradient in fenced and unfenced grazing areas of the Gaborone north, Botswana. *Journal of Animal Research and Nutrition*, 2017, 2(2): 151-159.
- [34] Loydi A, Zalba S M, Distel R A. Vegetation change in response to grazing exclusion in montane grasslands, Argentina. *Plant Ecology and Evolution*, 2012, 145(3): 313-322.
- [35] Peco B, Navarro E, Carmona C P, Medina N G, Marques M J. Effects of grazing abandonment on soil multifunctionality: the role of plant functional traits. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 249: 215-225.
- [36] 侯扶江,徐磊.生态系统健康的研究历史与现状. *草业学报*, 2009, 18(6): 210-225.
- [37] Fan Q S, Zhang J, Shi H R, Chang S H, Hou F J. Metagenomic profiles of yak and cattle manure resistomes in different feeding patterns before and after composting. *Applied and Environmental Microbiology*, 2023, 89(7): e0064523.
- [38] 侯扶江,李岚,王树林,崔雄雄,尤杨,黄小娟,郭雅蓉,娄珊宁,石海仁,李腾飞.草原生态保护与修复//草原生态文明建设蓝皮书(2012-2022).北京:学苑出版社,2023:131-146.
- [39] 陈楠,李广,侯扶江.放牧对围栏封育高寒草甸植被特征和生产力的影响. *甘肃农业大学学报*, 2016, 51(2): 104-110.
- [40] Huang X J, Liu Y, Cong Y M, Zhang Y W, Zhao X Z, Huang L, Li Q Q, Li L, Hou F J. Soil moisture stability of rangeland is higher than that of woodland and cropland in the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109543.
- [41] Forbes E S, Cushman J H, Burkepille D E, Young T P, Klope M, Young H S. Synthesizing the effects of large, wild herbivore exclusion on ecosystem function. *Functional Ecology*, 2019, 33(9): 1597-1610.
- [42] 白于,苏纪帅,程积民.黄土区不同封育时期天然草地的根系生物量分布. *草业科学*, 2013, 30(11): 1824-1830.
- [43] 沈艳,马红彬,赵菲,谢应忠.荒漠草原土壤养分和植物群落稳定性对不同管理方式的响应. *草地学报*, 2015, 23(2): 264-270.
- [44] Duniway M C, Geiger E L, Minnick T J, Phillips S L, Belnap J. Insights from long-term ungrazed and grazed watersheds in a salt desert Colorado Plateau ecosystem. *Rangeland Ecology & Management*, 2018, 71(4): 492-505.
- [45] 单贵莲,初晓辉,陈功,谢勇,袁福锦,尹海燕.滇西北亚高山草甸土壤养分及酶活性对放牧和封育的响应. *中国草地学报*, 2018, 40(4): 82-87.
- [46] 宋珊珊,张建胜,郑天立,张帆,朱剑霄.围栏封育对青海海北高寒草甸植被碳储量的影响. *草业科学*, 2020, 37(12): 2414-2421.
- [47] 苗福泓,郭雅婧,缪鹏飞,郭正刚,沈禹颖.青藏高原东北边缘地区高寒草甸群落特征对封育的响应. *草业学报*, 2012, 21(3): 11-16.
- [48] Listopad C M C S, Köbel M, Príncipe A, Gonçalves P, Branquinho C. The effect of grazing exclusion over time on structure, biodiversity, and regeneration of high nature value farmland ecosystems in Europe. *The Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 926-936.
- [49] Aldezabal A, Moragues L, Odriozola I, Mijangos I. Impact of grazing abandonment on plant and soil microbial communities in an Atlantic Mountain grassland. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 251-260.
- [50] F I H, Liu B, Liu Z M, Fang Y T, Busso C A. Effects of grazing on plant species diversity and carbon partitioning in semiarid rangelands of northeastern China. *Phyton*, 2015, 84(1): 209-221.
- [51] 旦增塔庆,白玛嘎翁,多吉顿珠,拉巴.围封年限对西藏高寒草甸植被特征与土壤养分的影响. *草业科学*, 2018, 35(1): 10-17.
- [52] 贺慧丹,祝景彬,未亚西,李红琴,杨永胜,李英年.高寒草甸土壤贮水量对封育措施的响应. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 210-216, 223.
- [53] Sun F F, Sun W J, Huang Y, Zhang W, Yu L F, Wang J T. Precipitation does not amplify the efficiency of fencing measures for temperate grassland restoration: a case study in Northern China based on remote sensing. *Ecological Engineering*, 2017, 105: 252-261.
- [54] Kong L Q, Wu T, Xiao Y, Xu W H, Zhang X B, Daily G C, Ouyang Z Y. Natural capital investments in China undermined by reclamation for cropland. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7: 1771-1777.
- [55] Wang X, Li S J, Wang L P, Zheng M, Wang Z M, Song K S. Effects of cropland reclamation on soil organic carbon in China's black soil region over the past 35 years. *Global Change Biology*, 2023, 29(18): 5460-5477.
- [56] Fierer N, Ladau J, Clemente J C, Leff J W, Owens S M, Pollard K S, Knight R, Gilbert J A, McCulley R L. Reconstructing the microbial diversity and function of pre-agricultural tallgrass prairie soils in the United States. *Science*, 2013, 342(6158): 621-624.
- [57] Price E L, Sertić Perić M, Romero G Q, Kratina P. Land use alters trophic redundancy and resource flow through stream food webs. *The Journal of Animal Ecology*, 2019, 88(5): 677-689.
- [58] Chmolewska D, Nobis M, Nowak A, Maślak M, Kojs P, Rutkowska J, Zubek S. Rapid change in forms of inorganic nitrogen in soil and moderate weed invasion following translocation of wet meadows to reclaimed post-industrial land. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(8): 964-978.
- [59] van Wesemael B, Chartin C, Wiesmeier M, von Lütow M, Hobley E, Carnol M, Krüger I, Campion M, Roisin C, Hennart S, Kögel-Knabner I. An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 274: 62-75.
- [60] Jones A R, Orton T G, Dalal R C. The legacy of cropping history reduces the recovery of soil carbon and nitrogen after conversion from continuous cropping to permanent pasture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216: 166-176.
- [61] Hu A, Zhang J, Chen X J, Millner J P, Chang S H, Bowatte S, Hou F J. The composition, richness, and evenness of seedlings from the soil seed bank of a semi-arid steppe in Northern China are affected by long-term stocking rates of sheep and rainfall variation. *The Rangeland Journal*, 2019, 41(1): 23.
- [62] 常生华,侯扶江,王召锋,彭泽晨,刘永杰.一种通过放牧管理调控鼠害的方法:中国,202111028729.6. 2023-05-30.
- [63] 孙义,侯扶江,刘阳,张岩.一种采用机械化防治草原鼠害的方法.中国,201610057819.0. 2019-02-05.
- [64] 李小龙,曹文侠,李文,张晓燕,徐长林,韦应莉,师尚礼.划破草皮对不同地形高寒草甸草原土壤特征及地下生物量的影响. *草业学*

- 报, 2016, 25(6): 26-33.
- [65] Streitberger M, Holtmann L, Bültmann H, Schmidt C, Fartmann T. Effects of montane heathland rejuvenation on phytodiversity depend on management intensity and succession. *Ecological Engineering*, 2021, 168: 106292.
- [66] Wang Y X, Sun Y, Liu Y, Wang Z F, Chang S H, Qian Y Q, Chu J M, Hou F J. Ecological thresholds of toxic plants for sheep production and ecosystem multifunctionality and their trade-off in an alpine meadow. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323: 116167.
- [67] Ma Z W, Wu J, Li L, Zhou Q P, Hou F J. Litter-induced reduction in ecosystem multifunctionality is mediated by plant diversity and cover in an alpine meadow. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 773804.
- [68] 马源, 杨洁, 张德罡, 周恒, 周会程, 陈建纲. 高寒草甸退化对祁连山土壤微生物生物量和氮矿化速率的影响. *生态学报*, 2020, 40(08): 2680-2690.
- [69] 郑巧燕, 唐忠民, 卫万荣. 草原啮齿类动物生态作用及生存威胁. *草业科学*, 2019, 36(11): 2962-2970.
- [70] 杨增增, 张春平, 董全民, 杨晓霞, 褚晖, 李小安, 魏琳娜, 张艳芬. 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响. *草地学报*, 2018, 26(5): 1071-1077.
- [71] 贺金生, 卜海燕, 胡小文, 冯彦皓, 李守丽, 朱剑霄, 南志标. 退化高寒草地的近自然恢复: 理论基础与技术途径. *科学通报*, 2020, 65(34): 3898-3908.
- [72] 李鑫洋, 杜俊颖, 杨莉, 段海峰, 刘东霞, 李军, 薛祝林, 刘贵河. 免耕补播对冀西北坝上地区草原植被群落特征的影响. *草地学报*, 2022, 30(9): 2249-2254.
- [73] 张英俊, 周冀琼, 杨高文, 荆晶莹, 刘楠. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践. *科学通报*, 2020, 65(16): 1546-1555.
- [74] 刘涛, 朱迪, 吕婷, 梁瑞芳, 刘峰, 马子兰, 李以康, 马玉枝, 苏旭. 青海湖区芨芨草原土壤养分对翻耕和补播措施的响应. *植物研究*, 2021, 41(2): 270-280.
- [75] 姬万忠, 王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响. *草业科学*, 2016, 33(5): 886-890.
- [76] 李飞, 禹朴家, 神祥金, 宋彦涛, 李强, 张海艳, 周道玮. 退化草地补播草木樨、黄花苜蓿的生产力和土壤碳截获潜力. *草业科学*, 2014, 31(3): 361-366.
- [77] 刘玉玲, 王德平, 张泓博, 王国富, 李鹏珍, 戎郁萍. 补播时间和补播草种对退化草甸草原植物群落的影响. *草地学报*, 2022, 30(11): 3098-3105.
- [78] Hu A, Millner J, Hou F J. Introduction of woody and herbaceous legumes influences productivity, diversity and soil properties in a degraded grassland. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(13): 3762-3772.
- [79] 吴宛萍, 马红彬, 陆琪, 周瑶, 宿婷婷, 朱琳. 补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响. *草业科学*, 2020, 37(10): 1959-1969.
- [80] 黄玲, 王榛, 马泽, 杨发林, 李岚. 长期放牧和氮添加对黄土高原典型草原长芒草种群生长的影响. *植物生态学报*, 2024, 48(3): 317-330.
- [81] 侯扶江, 任继周. 甘肃马鹿冬季放牧践踏作用及其对土壤理化性质影响的评价. *生态学报*, 2003, 23(3): 486-495.
- [82] Yuan X, Knelman J E, Gasarch E, Wang D L, Nemergut D R, Seastedt T R. Plant community and soil chemistry responses to long-term nitrogen inputs drive changes in alpine bacterial communities. *Ecology*, 2016, 97(6): 1543-1554.
- [83] Zheng Z, Bai W M, Zhang W H. Clonality-dependent dynamic change of plant community in temperate grasslands under nitrogen enrichment. *Oecologia*, 2019, 189(1): 255-266.
- [84] Zhang C, Liu G B, Song Z L, Wang J, Guo L. Interactions of soil bacteria and fungi with plants during long-term grazing exclusion in semiarid grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 124: 47-58.
- [85] Knoblauch C, Watson C, Becker R, Berendonk C, Wichern F. Change of ergosterol content after inorganic N fertilizer application does not affect short-term C and N mineralization patterns in a grassland soil. *Applied Soil Ecology*, 2017, 111: 57-64.
- [86] Luo R Y, Fan J L, Wang W J, Luo J F, Kuzyakov Y, He J S, Chu H Y, Ding W X. Nitrogen and phosphorus enrichment accelerates soil organic carbon loss in alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *The Science of the Total Environment*, 2019, 650(Pt 1): 303-312.
- [87] Yan R R, Yu T Q, Liu H M, Lv S J, Chen B R, Wu Y L, Que G P, Wei Z J, Xu L J, Zhu X Y, Yang G X, Xin X P. Effects of different grassland utilization methods on the germinable soil seed bank of the Hulunbuir meadow steppe. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1230725.
- [88] Ziter C, MacDougall A S. Nutrients and defoliation increase soil carbon inputs in grassland. *Ecology*, 2013, 94(1): 106-116.
- [89] Ma P F, Zhao J X, Zhang H Z, Zhang L, Luo T X. Increased precipitation leads to earlier green-up and later senescence in Tibetan alpine grassland regardless of warming. *The Science of the Total Environment*, 2023, 871: 162000.
- [90] Qin J X, Duan W L, Zou S, Chen Y N, Huang W J, Rosa L. Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 3084.
- [91] 高天明, 张瑞强, 刘昭, 郝瑞. 灌溉对退化草地的恢复作用. *节水灌溉*, 2009(8): 26-28.
- [92] 仝淑萍, 苗彦军, 边步云, 贾书刚, 关法春, 郭红宝, 杨光宗. 不同恢复措施对藏北草地群落生产力和多样性影响的研究. *草地学报*, 2018, 26(5): 1078-1083.
- [93] 张俊刚, 姜慧敏, 李雅茹, 宝音陶格涛. 施肥、灌溉对切根改良草地群落的影响. *中国草地学报*, 2016, 38(1): 81-86.
- [94] Mudge P L, Millar J, Pronger J, Roulston A, Penny V, Fraser S, Eger A, Caspari T, Robertson B, Mason N W H, Schipper L A. Impacts of irrigation on soil C and N stocks in grazed grasslands depends on aridity and irrigation duration. *Geoderma*, 2021, 399: 115109.
- [95] Renwick A, Dynes R, Johnstone P, King W, Holt L, Penelope J. Challenges and opportunities for land use transformation: insights from the central Plains water scheme in New Zealand. *Sustainability*, 2019, 11(18): 4912.
- [96] Yu H, Deng Y, He Z L, Pendall E, Carrillo Y, Wang S, Jin D C, Wu L Y, Wang A J, Xu Y, Liu B Y, Tai X, Zhou J Z. Stimulation of soil microbial functioning by elevated CO<sub>2</sub> may surpass effects mediated by irrigation in a semiarid grassland. *Geoderma*, 2021, 401: 115162.

- [97] 白涛,许佳,邓铭江,慕鹏飞,李永兵,赵星. 注重干旱区河谷林草生态保护与修复的滴灌灌溉研究. 水利学报, 2021, 52(08): 989-1000.
- [98] Gates E A, Vermeire L T, Marlow C B, Waterman R C. Fire and season of postfire defoliation effects on biomass, composition, and cover in mixed-grass prairie. *Rangeland Ecology & Management*, 2017, 70(4): 430-436.
- [99] Ratajczak Z, Nippert J B, Briggs J M, Blair J M. Fire dynamics distinguish grasslands, shrublands and woodlands as alternative attractors in the Central Great Plains of North America. *Journal of Ecology*, 2014, 102(6): 1374-1385.
- [100] 李媛,程积民,魏琳,陈芙蓉. 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化. 生态学报, 2013, 33(7): 2131-2138.
- [101] Pereira P, Cerda A, Martin D, Úbeda X, Depellegrin D, Novara A, Martínez-Murillo J F, Brevik E C, Menshov O, Comino J R, Miesel J. Short-term low-severity spring grassland fire impacts on soil extractable elements and soil ratios in Lithuania. *The Science of the Total Environment*, 2017, 578: 469-475.
- [102] Smith S W, Woodin S J, Pakeman R J, Johnson D, van der Wal R. Root traits predict decomposition across a landscape-scale grazing experiment. *New Phytologist*, 2014, 203(3): 851-862.
- [103] Berleman S A, Suding K N, Fry D L, Bartolome J W, Stephens S L. Prescribed fire effects on population dynamics of an annual grassland. *Rangeland Ecology & Management*, 2016, 69(6): 423-429.
- [104] Girona-García A, Badía-Villas D, Martí-Dalmau C, Ortiz-Perpiñá O, Mora J L, Armas-Herrera C M. Effects of prescribed fire for pasture management on soil organic matter and biological properties: a 1-year study case in the Central Pyrenees. *The Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1079-1087.
- [105] 邹小艳,罗彩云,赵亮,徐世晓. 冬季火烧对高寒草甸牧草产量及品质的影响. 草原与草坪, 2016, 36(5): 95-97, 104.
- [106] Yan Z W, Chen F Y, Zhang X, Cai W J, Chen C Y, Liu J, Wu M N, Liu N J, Ma B, Wang M Y, Chao D Y, Gao C J, Mao Y B. Endocytosis-mediated entry of a caterpillar effector into plants is countered by Jasmonate. *Nature Communications*, 2023, 14: 6551.
- [107] Waadt R, Seller C A, Hsu P K, Takahashi Y, Munemasa S, Schroeder J I. Plant hormone regulation of abiotic stress responses. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2022, 23: 680-694.
- [108] Zhao X X, Feng Y H, Xu K X, Cao M Q, Hu S Y, Yang Q L, Liu X Q, Ma Q, Hu T Y, Kelly M, Guo Q H, Su Y J. Canopy structure: an intermediate factor regulating grassland diversity-function relationships under human disturbances. *Fundamental Research*, 2022, 3(2): 179-187.
- [109] Wang Y X, Sun J, Hou S J, Tan Y H, Wang Z F, Chang S H, Chen J H, Qian Y Q, Chu J M, Hou F J. Plateau pika burrowing and yak grazing jointly determine ecosystem greenhouse gas emissions of alpine meadow. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(18): 3914-3925.
- [110] Li L, He X Z, Zhang X M, Hu J Q, Wang M Y, Wang Z, Hou F J. Different effects of grazing and nitrogen addition on ecosystem multifunctionality are driven by changes in plant resource stoichiometry in a typical steppe. *Plant and Soil*, 2022, 481(1/2): 179-194.
- [111] Wang S L, Hou F J. Seed bank of livestock dung in the Qilian Mountain grassland: a potential resource for vegetation recovery. *Rangeland Ecology & Management*, 2021, 78: 90-99.
- [112] Ocumpaugh W R, Archer S, Stuth J W. Switchgrass recruitment from broadcast seed vs. seed fed to cattle. *Journal of Range Management*, 1996, 49(4): 368.
- [113] Gokbulak F. Recovery and germination of grass seeds ingested by cattle. *Journal of Biological Sciences*, 2006, 6(1): 23-27.
- [114] Wang S L, Lu W H, Waly N, Ma C H, Zhang Q B, Wang C J. Recovery and germination of seeds after passage through the gut of Kazakh sheep on the north slope of the Tianshan Mountains. *Seed Science Research*, 2017, 27(1): 43-49.
- [115] Mancilla-Leytón J M, Fernández-Alés R, Vicente A M. Plant-ungulate interaction: goat gut passage effect on survival and germination of Mediterranean shrub seeds. *Journal of Vegetation Science*, 2011, 22(6): 1031-1037.
- [116] Qi X L, Xu H J, Teng R Y, Chen T, Wang X D. Ecological restoration largely alleviates livestock grazing pressure in a montane grassland. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 467: 143044.
- [117] Liang J, Krauss K W, Finnigan J, Stuart-Williams H, Farquhar G D, Ball M C. Linking water use efficiency with water use strategy from leaves to communities. *New Phytologist*, 2023, 240(5): 1735-42.
- [118] Huang X J, He M Y, Li L, Wang Z, Shi L Y, Zhao X Z, Hou F J. Grazing and precipitation addition reduces the temporal stability of aboveground biomass in a typical steppe of Chinese Loess Plateau. *Science of The Total Environment*. 2023, 905: 167156.
- [119] 任继周,侯扶江. 山地-绿洲-荒漠的系统耦合是祁连山水资源保护的关键措施. 草业科学, 2010, 27(2): 4-7.
- [120] 侯扶江,南志标,任继周. 作物-家畜综合生产系统. 草业学报, 2009, 18(5): 211-234.
- [121] Dong L, Zheng Y, Martinsen V, Liang C Z, Mulder J. Effect of grazing exclusion and rotational grazing on soil aggregate stability in typical grasslands in inner Mongolia, China. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 844151.
- [122] Yang C T, Millner J P, Sun Y, Yuan H, Liu Y, Zhang Y, Wang Z, Chang S H, Hou F J. Supplementary feeding yak with oat hay improves nitrogen cycling in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Agricultural Systems*, 2021, 193: 103216.
- [123] 侯扶江. 中国草原生产力与食品安全研究. 北京: 科学出版社, 2017.
- [124] 董世魁,张宇豪,王冠聪. 草地健康与退化评价:概念、原理及方法. 草业科学, 2023, 40(12): 2971-2981.
- [125] Huang X J, He M Y, Guo Z X, Li L, Hou F J. Effects of grazing and precipitation addition induced by functional groups on the relationship between aboveground biomass and species richness of a typical steppe. *Journal of Environmental Management*, 2023, 339: 117924.
- [126] 侯扶江,常生华,于应文,林慧龙. 放牧家畜的践踏作用研究评述. 生态学报, 2004, 24(4): 784-789
- [127] 侯扶江,谢凯丽. 正确认识毒害草科学管理草原. 民主与科学, 2023(5): 36-38.