

DOI:10.11686/cyxb2024197

<http://cyxb.magtech.com.cn>

李毅夫, 孙斌, 南志标, 等. 中国北方林间草地分类体系研究. 草业学报, 2025, 34(3): 175—188.

LI Yi-fu, SUN Bin, NAN Zhi-biao, *et al.* Classification system of inter-silva grasslands in Northern China. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 175—188.

中国北方林间草地分类体系研究

李毅夫^{1,2}, 孙斌^{1,2}, 南志标^{3,4}, 刘世荣^{5,6}, 高志海^{1,2*}, 黄晓东³, 张美男^{5,6}, 李长龙⁷,
张景波⁸, 吴水荣⁹, 王琤瑜^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 国家林业和草原局林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091; 3. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 4. 国家林业和草原局草原研究中心, 北京 100091; 5. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091; 6. 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 7. 广州商学院信息技术与工程学院, 广东 广州 511363; 8. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200; 9. 中国林业科学研究院林业科技信息研究所, 北京 100091)

摘要: 林间草地作为森林和草地两个相邻生态系统的过渡区, 具有重要的生态价值。然而, 国内外对其认识存在较大差异, 且尚未形成普遍接受的概念和分类体系, 限制了对林间草地的生态保护和合理利用。为解决这一问题, 在综合分析国内外相关研究成果并开展广泛实地调研的基础上, 给出了林间草地的科学定义及内涵, 即在森林分布区内生长于大面积森林内部或边缘的成片草地, 以及与稀疏林木或灌木共生的区域。在充分考虑我国北方林间草地的地理环境特征、可利用性及其在中、高空间分辨率遥感影像中的可辨识性基础上, 建立了我国北方林间草地分类体系, 包括林窗草地、林缘草地、疏林草地和灌木林草地4个类型及12个亚类。研究结果为我国林间草地的生态保护和可持续利用提供科学支撑。

关键词: 林间草地; 分类体系; 林窗草地; 林缘草地; 疏林草地; 灌木林草地

Classification system of inter-silva grasslands in Northern China

LI Yi-fu^{1,2}, SUN Bin^{1,2}, NAN Zhi-biao^{3,4}, LIU Shi-rong^{5,6}, GAO Zhi-hai^{1,2*}, HUANG Xiao-dong³,
ZHANG Mei-nan^{5,6}, LI Chang-long⁷, ZHANG Jing-bo⁸, WU Shui-rong⁹, WANG Beng-yu^{1,2}

1. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 3. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 4. Grassland Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 5. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 6. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 7. School of Information Technology and Engineering, Guangzhou College of Commerce, Guangzhou 511363, China; 8. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, China; 9. Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Inter-silva grasslands, serving as a critical transitional zone between forest and grassland ecosystems or grassland within forest land, have significant ecological importance. However, a widely accepted concept and a unified standard classification framework for inter-silva grasslands is not well recognized, neither domestically nor internationally, and this lack of recognition leads to constraints on their ecological conservation and rational

收稿日期: 2024-05-22; 改回日期: 2024-07-10

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2021MC002-01)资助。

作者简介: 李毅夫(1986—), 男, 吉林九台人, 博士。E-mail: liyifu@ifrit.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhgao@ifrit.ac.cn

utilization. Based on a comprehensive analysis of the state-of-the-art research findings from around the world along with extensive field surveys in typical forests of northern China, this study proposes a scientific definition of inter-silva grasslands. Inter-silva grasslands are defined as grassland patches of varying sizes and forms that occur within or on the edges of large forests, or that are interspersed with sparse trees or shrubs. Considering the geographic environmental features, usability, and visibility derived from medium to high spatial resolution remote sensing imagery, this classification system for northern China's inter-silva grasslands includes four classes: forest gap grasslands, forest edge grasslands, sparse forest grasslands, and shrub grasslands, with further subdivision into twelve distinct subclasses. This study provides a conceptual framework to support the ecological protection and sustainable use of inter-silva grasslands in northern China.

Key words: inter-silva grasslands; classification system; forest gap grasslands; forest edge grasslands; sparse forest grasslands; shrub grasslands

草地生态系统是全球陆地生态系统的重要组成部分^[1],具有不可替代的生态价值。草地生态系统不仅承载着丰富的生物多样性,还在调节气候、保持水土和固碳等方面提供了重要的生态服务,对社会经济发展、环境保护和国家粮食安全有着深远影响^[2]。中国的草地生态系统,以其多样的地理环境和广泛的分布类型,涵盖了高寒草甸、典型草原和荒漠草原等多种类型,呈现出丰富的生态多样性^[3-4]。然而,长期以来,由于人口增长、农业扩张及过度放牧等人类活动,草地资源受到了严重破坏^[2,5]。同时,全球气候变化进一步加剧了草地退化、水土流失、土地沙化和生物多样性丧失等问题^[5-6]。这些问题严重威胁着草地资源的安全和可持续利用,对我国生态安全和社会经济发展构成了重大挑战。

为应对这些挑战,中国政府采取了一系列政策和措施,以促进林草资源的可持续管理和高质量发展。特别是国家林业和草原局的成立,标志着林草资源综合治理和融合发展新时代的开启^[7]。这些举措不仅涵盖了草原保护和修复的各个方面,还强调了林草融合对于维护生态平衡和提升生态系统服务功能的重要性,通过激发林地与草地资源间的协同效应,以实现生态、社会和经济效益的最大化。

在国内外,“林间草地”作为一个特定的概念和研究领域,学术界并没有给予足够的重视和关注。早在1979年召开的第三次东北草原学术会议上,与会学者就提及了“林间草地”这一术语^[8]。此后,国内学者在林间草作^[9-10]、林间草地放牧实践^[11]、林区草业的发展^[12-13]、林间草地放牧管理^[14]等方面开展了一些研究与探讨,逐步推动了我国林间草地的研究和利用。在国外的相关研究中,尚未有与“林间草地”完全对等的专业术语,但相关概念和研究却相当丰富。从森林和草原的生态特征角度来看,与林间草地密切相关的概念包括Forest-steppe^[15-16]、Wooded-steppe^[17]、Open woodland^[18-19]和Savanna^[19]等;从土地利用与管理的角度看,与林间草地密切相关的概念有Wood-pasture^[20]、Silvopasture^[21-22]、Dehesa^[23]、Montado^[23]和Agroforestry^[24]等。国外对这些概念的研究和实践反映了生态系统类型与土地利用方式的多样性,不仅揭示了林间草地在生态和经济上的重要性,也为本研究探索和建立适用于中国北方林间草地分类体系提供了重要的参考和启示。

当前,虽然国内外已有大量与林间草地相关的研究,但仍存在着概念不清、分类混乱、数据匮乏等挑战。这些问题在一定程度上限制了对林间草地的深入研究和资源高效利用。因此,本研究旨在通过综合分析国内外相关研究成果,并结合实地调查,明确林间草地的定义,构建适用于中国北方的科学、系统的林间草地分类体系,以期丰富林间草地系统的理论框架以及林草地的生态系统服务功能,促进对林间草地资源管理和合理利用。

1 林间草地的定义与内涵

1.1 林间草地的定义

在全球范围内,基于自然地理环境、生态系统特征以及不同的经济社会文化背景,林间草地以多种形态存在且具有不同的名称。其中,Forest-steppe主要位于温带地区,其特点是由斑块状的林地和草地组成的生态交错

带^[16]。与之相似的 Wooded-steppe 既有树木又有草地,但树木不形成封闭的树冠,常见于人类活动频繁或干预的区域^[17]。Open woodland 通常用来描述低密度的森林,这种生态系统包含间隔较大的树木,它们的树冠并不接触,形成了开放的树冠,中层树冠层不明显,允许阳光穿透,能够支持多样化的下层草本植物^[18]。而 Savanna 则是以草原和分散生长的树木为特征的热带和亚热带生态系统^[19]。

20 世纪 80 年代以来,国内学者陆续开展了对林间草地的研究,并对其概念进行探讨。贾慎修^[25]在中国草原分类系统中,讨论林缘草地类、灌木草丛类、山丘草丛类、山地稀树草甸类及山地草甸类时,均涉及林间草地的内容。陈安仁^[26]在研究山西省草地类型演变过程中提出,山西省的林间草地主要是森林破坏后形成的次生植被。杨汝荣^[27]在对南岭山区草地资源的研究中,将林地周围、林间、林缘以及林下草地统一归类为林间草地。高玮等^[28]认为林间草地大部分是森林大面积砍伐和森林火灾后形成的,是植物群落演替的初级阶段。包维楷等^[29]认为干扰下的森林砍伐是林间草地形成的主要动因。白慧强等^[30]认为林间草地是指在森林分布区,林木和灌木郁闭度分别在 0.3 和 0.4 以下的草地,是林草生物措施、工程措施和保土耕作措施的综合自然体。雷彩芳等^[31]认为林间草地是指森林生态系统完整性被破坏后形成的次生草本群落,呈斑块状分布于森林中,与森林群落共同构成林草复合生态景观。

综合国内外学者的相关研究,本研究认为林间草地是一个具有丰富生物多样性和复杂结构的生态系统,其形成和发展是多种自然和人为因素共同作用的结果。这一生态系统不仅包括由人为干扰(如森林砍伐和放牧等)引起的次生生态系统,还包括在自然过程中因生态扰动(如气候变化、地形地貌以及土壤条件等)形成的多样化生态系统。本研究在综合分析国内外林间草地概念与类型的基础上,结合实地调研,提出了林间草地的科学定义:即在森林分布区,生长于大面积森林内部或边缘的成片草地,以及与稀疏林木或灌木间生长的林草共生区域。

1.2 林间草地的生态特征

1.2.1 结构与分布 林间草地通常位于森林和草原的过渡带,不是森林和草原的简单重叠或混合,而是由两者相互作用形成的独特生态系统^[32-33],其典型特征是草本植物与木本植物共生^[34]。研究表明,当林间草地的分布主要由气候决定时,呈地带状分布;当受局部因素(土壤、地形)影响时,则呈散点状或岛状分布^[35]。这种分布特性揭示了林间草地在不同环境条件下的多样性和复杂性。从空间结构上看,林间草地不仅包含周边大面积的森林和草原斑块,也有分散的小斑块组成的镶嵌状格局,主要表现为两种边缘特征:一种是断裂状边缘,即两个生态系统具有较为明显的物理界限,如林地和草原之间的突然过渡;另一种是镶嵌状边缘,即两个生态系统在空间上的渐进过渡和相互交织。

1.2.2 基本属性 林间草地的基本属性体现在其独特的生态系统结构、物种多样性和生态功能上,共同反映了系统的内在复杂性和动态变化^[33]。林间草地的过渡性表现在物种组成、生境类型和生态过程上,为众多物种提供了生存空间和生态位^[34]。特别是,由于森林与草地之间的生物及非生物参数存在显著差异,导致形成空间异质性,这不仅促进了多样化的生态功能,也为物种提供了多样化的生境^[36],增加了生态系统的复杂性与稳定性^[37]。环境与生物因子在林间草地中的空间梯度变化及其产生的边缘效应和特殊微气候条件,为特定物种的形成与分布创造了条件。在森林边缘区域,由于较强的光照和风力影响,形成了与森林内部和开阔草地显著不同的微气候条件。这些微气候条件不仅影响了物种的分布,还可能加剧环境梯度的变化,进一步塑造生态系统的结构与功能^[38]。然而,林间草地对环境变化的脆弱性与敏感性也不容忽视。气候变化、土地利用变化以及人为干扰等因素均可能对其构成威胁。林间草地在时间和空间上的变化,显示了其对季节性波动、生态扰动以及长期气候变化的敏感响应。尺度效应则强调了这些生态系统的特性和功能如何随尺度而异。从微观生物间相互作用到宏观景观格局的变化,尺度的差异反映了林间草地生态过程和生物多样性的变化特征。

1.3 林间草地的功能

1.3.1 生态价值 林间草地生态系统的形态和特性受多种因素影响,包括树木和草地的分布、密度及其所处的气候条件。这些因素共同塑造了林间草地的多样性,使其在全球范围内展现出多种形态。林地与草地的斑块状分布不仅反映了局部水分和土壤条件的异质性,还增强了生态系统应对极端气候的适应性^[39]。这些草地通常

支持高度多样化的生物群落,尤其在干旱和半干旱地区,为耐旱和耐寒物种提供了关键的栖息地,保障了这些物种的存续^[40]。

林间草地不仅在生物多样性保护上至关重要^[16,41],还在维持区域气候、水文平衡和土壤健康方面发挥了重要作用。其多层次的植被覆盖能有效减少水土流失,增强土壤的保水能力,维持水文平衡和土壤健康^[35]。此外,通过碳固定、水源涵养、土壤保护和生物多样性维护等生态过程,林间草地为应对气候变化和保护自然资源提供了至关重要的支持^[42],在全球碳循环、水分调节、土壤保护以及生物多样性保护等方面发挥着不可替代的作用^[39,43-44]。

1.3.2 社会经济价值 林间草地的社会—经济价值体现在多功能土地利用上。其中,Wood-pasture是一种结合了木材、草料生产和牲畜放牧的土地利用系统,主要分布在欧洲,具有悠久的历史^[45]。其显著特征是存在老龄化或古老的树木,为许多依赖死木或腐朽木材的物种(如昆虫、地衣和真菌等)提供独特栖息地,具有高度的生物多样性价值^[46]。Silvopasture则是一种有意识地将树木、饲料和家畜放牧整合在同一块土地上的农林复合系统,旨在实现生态、经济和社会多重效益^[47]。与传统 Wood-pasture 不同,Silvopasture 是基于健全的生态原则和科学管理实践而精心设计的系统^[21]。20世纪80年代后期,作为一种综合性的土地管理方法,Agroforestry在北美地区逐渐兴起^[48]。Agroforestry 将林业和农业元素进行融合,旨在通过多功能土地利用实现生态、经济和社会可持续发展目标。在过去的40多年里,Agroforestry 已经发展成为一门成熟的土地管理学科,形成了多种实践类型,如 Alley cropping、Forest farming、Riparian buffer 和 Windbreaks 等。所有这些实践的基本理念均是在同一经营单元内有目的地种植或保留树木,与作物和/或动物相互结合,以从同一片土地上获取多种产品或多重效益^[49]。

林间草地通过多目标、多层次、多方位地利用有限的土地资源^[50],促进不同物种在多个生态位上“相互依存”和“共生互补”^[51],从而实现土地资源的集约经营和生产潜力的最大化。然而,由于生态系统的复杂性和动态性,林间草地的管理需考虑保护关键物种、维持生态过程,以及考虑气候变化对生态系统的长期影响^[41,52]。同时,需要采取跨学科和多尺度的研究方法,深入了解生态系统动态变化的机制,以制定有效的管理计划。

2 我国北方林间草地分类体系

构建一个科学的林间草地分类体系是理解和保护这一独特生态系统的关键,不仅有助于加深对林间草地生态特性和服务功能的认识,还有助于合理利用和提升其生态价值与社会效益。科学分类对于指导林间草地资源的合理利用和保护,实现林草融合发展,提高生态系统服务具有重要意义。

2.1 分类体系构建原则和依据

2.1.1 基本原则 在构建林间草地分类体系时,应坚持科学性、系统性和可操作性原则,以确保体系的合理性、准确性和实用性,满足生态监测、科学研究和资源管理的需求。具体而言,林间草地分类体系的建立应遵循以下基本原则:

1)与地理环境的协调性原则:林间草地类型的划分应充分考虑林地和草地的类型、覆盖度和地理分布特征等因素,与当地的地理生态环境相协调,准确反映林间草地的地理环境特征。

2)可利用性原则:林间草地分类体系建立和深入研究的主要目的是实现资源的有序利用。因此,在分类体系的构建过程中,应注重林间草地类型的可利用性。

3)遥感可识别性原则:林间草地分类体系应与特定的空间分辨率或光谱分辨率的遥感影像一致,划定的类型应在相应影像上能够被识别,以便于资源评估和管理。

2.1.2 分类依据 为了对林间草地进行精确和科学地分类,在确定分类基本原则的基础上需要进一步明确具体的分类依据。这些依据不仅要能够准确描述林间草地的生态和物理特性,还需考虑其与周围环境的相互作用、生态功能和形成的原因等。

1)空间格局:林间草地与其周围森林之间的空间关系是其最显著的特征。草地处于森林的内部、边缘或与林地交错分布。这种空间格局直接影响草地的光照、温度和湿度条件,进而塑造其生态特性。

2)生境条件:生境条件包括森林郁闭度、地形和土壤类型等。森林郁闭度描述了林冠遮挡地面的程度,不同

的郁闭度会导致地面的光照、温度和湿度显著变化,进而影响草地的生态特性和物种组成;地形(如山坡、山谷或平原)影响草地生境的水热状况,塑造其生态特性和物种分布格局;土壤类型(如沙地、壤土或黏土)的物理化学性质,如肥力、排水和酸碱度,对植被类型和生态功能有重要影响。

3)植被类型:植被类型直接反映草地生态特性,不同类型通常与特定生态功能(如固沙、调节水循环或野生动物栖息地)相关。例如,一些耐旱的植被类型可能在固沙方面表现出色,而一些湿生植被可能在调节水分循环方面更为有效。

4)其他影响因素:除了上述因素外,林间草地的形成和特性还受到自然事件(如火灾、风灾)、人为活动(如耕作、放牧)、地理位置和特定生态条件的影响。例如,火灾可能会改变草地的物种组成,而人为活动可能会改变草地的生态功能。此外,土地利用的历史和频率等因素对于理解林间草地的长期生态变化及进行有效分类也至关重要。

2.2 分类体系组成及其特点

2.2.1 分类体系组成 遵循上述林间草地分类体系构建的基本原则和分类依据,同时考虑我国北方林间草地的地理环境和分布特点,以及中高分辨率遥感影像的识别能力和水平,构建了我国北方林间草地分类体系,具体分为类型和亚类两级。类型的划分以森林—草原的空间分布格局为基础,参考我国林地和草地分类中的郁闭度和植被覆盖度等指标界定林间草地类型。根据我国北方主要森林类型、干扰、森林郁闭度以及地理分布等因素进一步划分林间草地亚类。

综合考虑林间草地在我国北方的主要分布形式以及林地和草地的空间位置关系,我国北方林间草地划分为林窗草地、林缘草地、疏林草地和灌木林草地4个类型。林窗草地根据其成因划分为火烧迹地草地、山间谷地草地、采伐迹地草地及其他林窗草地4个亚类;林缘草地根据森林类型划分为针叶林林缘草地、阔叶林林缘草地和针阔混交林林缘草地3个亚类;疏林草地根据森林郁闭度划分为低郁闭度疏林草地和中郁闭度疏林草地2个亚类;灌木林草地基于其所生长的地理环境划分为山地灌木林草地、沙地灌木林草地及其他灌木林草地3个亚类。我国北方林间草地分类的具体指标见表1。

2.2.2 类型特点 我国北方林间草地的类型特点包括以下几个方面。

1)林窗草地:林窗草地是指被森林包围或出现在森林的空隙中的草地。这些“窗户”允许阳光直接照射到地面,为草本植物和其他低矮植被提供了独特的生长空间。林窗形成的原因包括自然灾害(如火灾、风倒木、病虫害)和人为活动(如采伐、放牧)等^[53-54]。不同形成方式导致林窗在面积、形状、周期性和生境异质性等方面存在差异,对植物群落的发展路径和物种组成产生显著影响^[53]。

林窗草地与其周围森林的紧密联系不仅在物理上相邻,还在生物多样性和生态功能方面存在重要的相互影响。森林为林窗草地遮阴和挡风,提供有机质来源,而草地则为森林动物提供食物和栖息地^[55]。此外,林窗草地的维持与种子质量、持续的种子库以及动物活动等因素紧密相关^[56]。林窗草地对维持生物多样性、促进特定物种的生存和扩散以及影响景观水平生态过程具有重要作用^[57]。这些生态空间为森林与草地生物提供食物和栖息地,有利于种子传播和动物活动,促进两个生态系统间的相互作用^[58]。在生物多样性保护和生态过程研究中,林窗草地扮演着不可或缺的角色。

根据形成的扰动类型和空间分布特征,林窗草地可以分为火烧迹地草地、采伐迹地草地、山间谷地草地及其他林窗草地4个亚类(图1)。

火烧迹地草地由自然燃烧(如雷击)或人为控制燃烧形成,其分布格局由火势蔓延路径和地形阻隔决定。火灾强度和频率是决定其生态特征的关键因素,影响着土壤理化性质和营养状况,进而影响火烧迹地草地的植被更新和动物群落的演替轨迹。适度的火烧扰动有利于维持群落的异质性和物种多样性,但过度或过于频繁的火烧将阻碍生态系统的恢复^[59]。

采伐迹地草地源于人类伐木活动,面积大小视伐木规模而定。这类林窗草地的显著特点是光照水平骤增和资源竞争降低,有利于先锋物种快速定殖。其植被演替还受制于物种扩散能力、植被恢复速率以及土壤扰动程度等因素。适当规模的采伐不仅能满足人类对木材和薪柴的需求,还能增加群落异质性、促进物种多样性^[60]。

表1 我国北方林间草地分类体系

Table 1 Classification system of inter-silva grasslands in northern China

类型 Class	代码 Code	亚类 Subclass	描述 Description
林窗草地 Forest gap grass- lands	11	火烧迹地草地 Burnt trace grasslands	大面积天然林或人工林的森林内部,火烧后尚未更新成林(郁闭度 ≤ 0.1)区域中成片存在的草地。Extensive grasslands within large natural or plantation forests that have not regenerated into forests after fire disturbance, with a canopy density of less than 0.1.
	12	采伐迹地草地 Cutting blank grasslands	大面积天然林或人工林的森林内部,采伐后尚未更新成林(郁闭度 ≤ 0.1)区域中成片存在的草地。Extensive grasslands within large natural or plantation forests that have not regenerated into forests after logging, with a canopy density of less than 0.1.
	13	山间谷地草地 Valley grasslands	位于森林集中分布的山谷区域,阳坡与阴坡均为大面积天然林或人工林,属天然形成的成片草地。Extensive natural grasslands located in valley regions where forests are concentrated, with both sunny and shady slopes covered by large areas of natural or plantation forests.
	14	其他林窗草地 Other forest gap grasslands	大面积天然林或人工林的森林内部,其他原因造成(天然或人为)的成片存在的草地。Extensive grasslands within large natural or plantation forests caused by other factors (natural or anthropogenic).
林缘草地 Forest edge grasslands	21	针叶林林缘草地 Conifer- ous forest edge grasslands	距离针叶林(郁闭度 > 0.2)边缘200 m成片存在的草地。以针叶树为建群种所组成的各类森林,主要由云杉、冷杉、落叶松和松树等一些耐寒树种组成,包括常绿和落叶,也包括天然和人工林。Extensive grasslands located 200 m from the edge of coniferous forests (canopy density greater than 0.2). These forests are composed of various coniferous tree species, including spruce, fir, larch, and pine, which are cold-tolerant and include both evergreen and deciduous species, encompassing both natural and plantation forests.
	22	阔叶林林缘草地 Broadleaf forest edge grasslands	距离阔叶林(郁闭度 > 0.2)边缘200 m成片存在的草地。以阔叶树种为主组成的树林,叶子宽阔,北方主要以落叶树种为主,部分常绿树种,包括天然林和人工林。Extensive grasslands located 200 m from the edge of broadleaf forests (canopy density greater than 0.2). These forests are primarily composed of broadleaf tree species with wide leaves, predominantly deciduous species in northern regions, with some evergreen species, including both natural and plantation forests.
	23	针阔混交林林缘草地 Mixed coniferous and broadleaf forest edge grass- lands	距离针阔混交林(郁闭度 > 0.2)边缘200 m成片存在的草地。由针叶树和阔叶树混交组成的森林,针叶林或阔叶林的占比均未超过65%。Extensive grasslands located 200 m from the edge of mixed coniferous and broadleaf forests (canopy density greater than 0.2). These forests consist of a mixture of coniferous and broadleaf trees, with neither coniferous nor broadleaf species exceeding 65% of the composition.
疏林草地 Sparse forest grasslands	31	低郁闭度疏林草地 Low canopy density sparse forest grasslands	因自然或人为因素等形成的乔木疏林地,林木郁闭度为0.1~0.2,林草相间生长。Sparse woodland areas formed by natural or anthropogenic factors, with a canopy density between 0.1 and 0.2, where trees and grass grow intermixed.
	32	中郁闭度疏林草地 Medi- um canopy density sparse forest grasslands	主要由乔木树种组成,森林郁闭度较低,为0.2~0.4,林草相间生长。Forests primarily composed of tree species with low canopy density ranging from 0.2 to 0.4, where trees and grass grow intermixed.
灌木林草 地 Shrub grasslands	41	山地灌木林草地 Mountain shrub grasslands	以灌木为建群种,常呈丛状分布,灌丛覆盖度在40%以上,灌木与草地相间生长,主要分布在山、丘陵和岩溶等区域,可放牧利用。Dominated by shrub species, typically forming clumps with shrub coverage exceeding 40%. Shrubs and grasses grow intermixed, primarily distributed in mountainous, hilly, and karst regions, and are suitable for grazing.
	42	沙地灌木林草地 Sandy shrub grasslands	以灌木为建群种,灌丛覆盖度在40%以上,灌草相间生长,主要分布于固定沙地和半固定沙地等沙质土地,生态脆弱,生态价值大于利用价值。Dominated by shrub species, with shrub coverage exceeding 40%. Shrubs and grasses grow intermixed, primarily distributed in fixed and semi-fixed sandy areas. These ecosystems are ecologically fragile, with ecological value outweighing their utilitarian value.
	43	其他灌木林草地 Other shrub grasslands	以灌木为主,灌丛覆盖度在40%以上,灌草相间生长,分布于典型草原、荒漠草原等非山地和沙地的区域。Dominated by shrub species, with shrub coverage greater than 40%. Shrubs and grasses grow intermixed, distributed in typical steppes and desert steppes, excluding mountainous and sandy areas.

山间谷地草地位于山谷地带,独特的地形条件造就了天然的林隙开阔地。这类草地的分布格局由山谷走向和地形起伏所决定,进而影响水热状况。山谷气流和水系为山间草地输送养分和扩散物种,调节其生态过程^[61]。

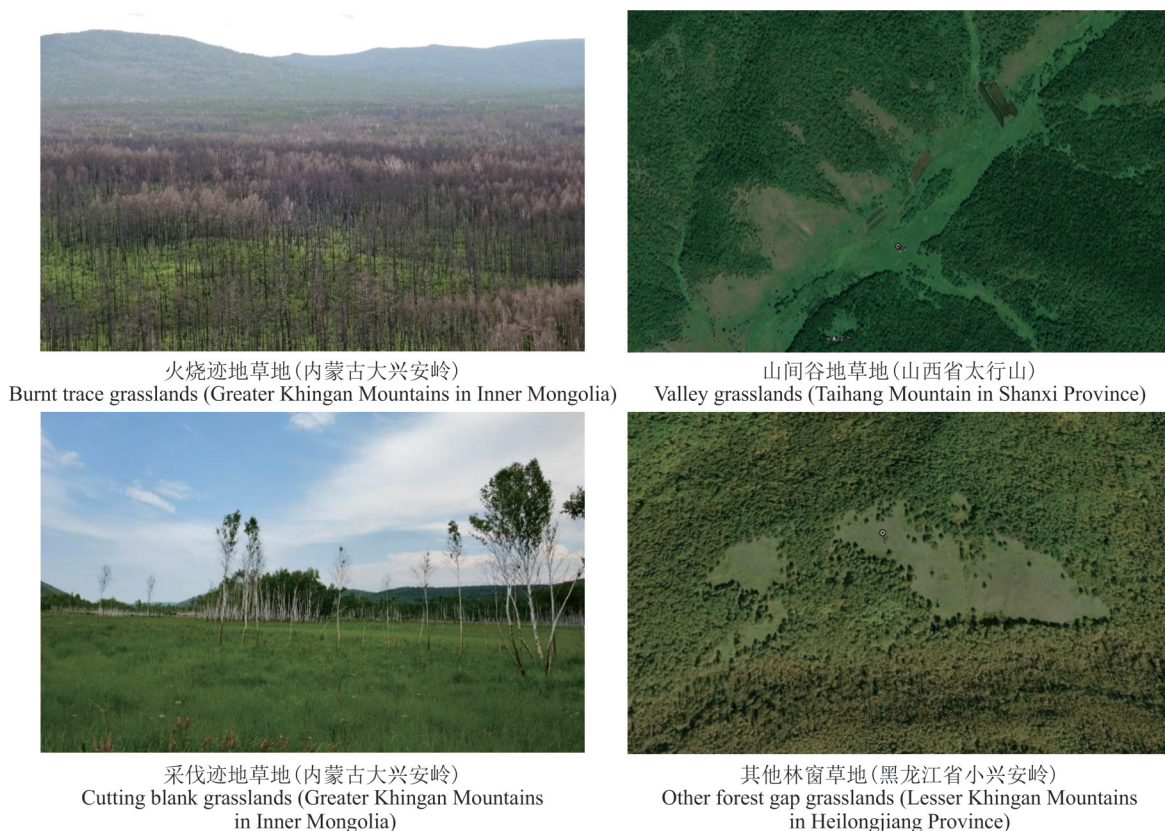


图 1 林窗草地

Fig. 1 Forest gap grasslands

其他林窗草地包括风倒木、滑坡、病虫害等形成的林窗草地,其分布具有一定的随机性,生态状况取决于具体的扰动过程和原因,这些扰动为植被的更新和演替提供了多样化的微环境,有助于不同物种的共存与生态系统的多样性维持^[62]。

在中国北方地区,林窗草地主要分布在大兴安岭、燕山山脉、太行山脉、秦岭、阿尔泰山以及天山山脉等森林集中区域。具体而言,火烧迹地草地和采伐迹地草地集中在内蒙古东部及黑龙江的大兴安岭、小兴安岭地区;山间谷地草地主要分布在山西、陕西和黑龙江等多山地区;其他林窗草地则广泛分布于内蒙古东部、新疆和陕西等地,是北方地区林窗草地的主要类别。

2) 林缘草地:林缘草地位于森林和草地间的过渡区域,沿林缘呈带状或斑块状分布,体现了两大生态系统在边界区域的生态梯度变化及相互作用,是联系森林和草地、维持生物多样性的关键环节^[63-64]。林缘草地在维持物种多样性方面具有重要作用^[65-66]。边缘不仅控制着生境斑块之间的物质和能量流动,影响景观动态和物种相互作用,也为多种生物提供食物和栖息地。在我国,林缘草地广泛分布于森林与草原交接带,被视为重要的季节性牧场或割草地^[25]。

林缘草地的范围和形态受多重因素影响而呈动态变化。环境因子如干旱会限制森林向外扩张,使林缘界线更加清晰。自然干扰如火灾也能阻止森林推进,在草地与林地间形成明确分界线。人为活动如农业、放牧、伐木等也会显著改变林缘草地的大小、形状和特征。

根据邻近森林的优势树种类型,林缘草地可分为针叶林林缘草地、阔叶林林缘草地和针阔混交林林缘草地 3 个亚类(图 2),以更好地理解其生态过程差异。

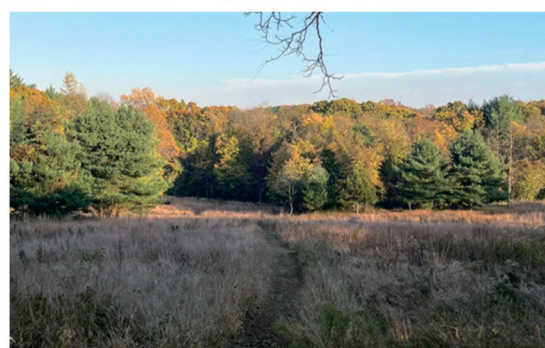
针叶林通常具有较高的森林郁闭度,阳光和温度变化较小,生物多样性相对较低。然而相比林内,林缘光照和温度变化更大,生物多样性因“边缘效应”而增加。针叶林的土壤通常酸性较强,有机质层较厚,影响林缘草地



针叶林林缘草地(宁夏贺兰山)
Coniferous forest edge grasslands (Helan Mountain in Ningxia)



阔叶林林缘草地(内蒙古大兴安岭)
Broadleaf forest edge grasslands
(Greater Khingan Mountains in Inner Mongolia)



针阔混交林林缘草地(黑龙江大兴安岭)
Mixed coniferous and broadleaf forest edge grasslands
(Greater Khingan Mountains in Heilongjiang Province)

图2 林缘草地

Fig. 2 Forest edge grasslands

的植物组成和土壤微生物的多样性。Walkiewicz等^[67]研究发现,不同森林类型边缘的微环境差异导致了土壤CO₂通量的变异。

与针叶林不同,阔叶林的郁闭度会随季节变化,光照可用性发生周期性变化,使林缘生境异质性增强。阔叶林边缘生物多样性高和生态结构相对复杂,能为小型哺乳动物和昆虫提供栖息地^[68]。Gaumont-Guay等^[69]研究表明,土壤温度、水分含量和植物种类组成的变化,影响了北方阔叶林边缘区域土壤CO₂的排放。阔叶林的土壤通常较为肥沃,有较好的水分保持能力,有利于多种草本植物的生长。

针阔混交林边缘结合了针叶林和阔叶林的特点形成了多层次的垂直结构和多样的微生境,为不同生态位的物种提供了丰富的栖息条件,有效促进了物种多样性,有助于维持生态系统的稳定性与功能多样性。

我国北方林缘草地主要分布于大兴安岭、燕山山脉、太行山脉、秦岭、祁连山脉、阿尔泰山、天山山脉以及昆仑山西段等地区。其中,针叶林林缘草地主要分布在新疆、甘肃以及内蒙古东部的大兴安岭一带;阔叶林林缘草地主要分布于青海、内蒙古东部、河北北部和甘肃部分地区;针阔混交林林缘草地则集中分布在内蒙古东部、河北北部、山西和甘肃等地。

3)疏林草地:疏林草地类似于Open woodland或Savanna,位于森林和草原之间的生态过渡区域,以较低的树木覆盖度和草本植物共存为特征。研究表明,疏林草地中的物种通常具有保守性特征,能够适应火灾、干旱和低土壤肥力等环境压力,而森林物种则表现出获取性特征,具有更高的竞争力和更快的资源获取能力^[70-72]。

疏林草地的分布和生态特征受到多种因素的影响,包括气候、土壤、水文条件、火灾和人为活动^[73]。与草地相比,疏林草地具有更高的生物多样性,不仅包括丰富的植物种类,还吸引了许多在森林和草原间迁移的动物物种^[74]。此外,疏林草地在维持草畜平衡的条件下具有重要的经济价值,可作为重要的季节性牧场。

根据冠层郁闭度,疏林草地可分为2个亚类:低郁闭度疏林草地和中郁闭度疏林草地(图3)。



低郁闭度疏林草地(内蒙古科尔沁沙地)
Low canopy density sparse forest grasslands
(Horqin Sandy Land in Inner Mongolia)



中郁闭度疏林草地(内蒙古正蓝旗)
Medium canopy density sparse forest grasslands
(Zhenglan Banner of Inner Mongolia)

图 3 疏林草地

Fig. 3 Sparse forest grasslands

低郁闭度疏林草地位于冠层郁闭度介于 0.1~0.2 的疏林中。由于树冠较为稀疏,这些草地能够接收到更多的阳光,支持更多草本植物的生长。此外,由于阳光充足,这些草地的温度和湿度条件更接近开阔环境。其物种组成和生态功能受到土壤类型、地形和其他环境因素的影响更大。

中郁闭度疏林草地位于冠层郁闭度介于 0.2~0.4 的疏林中。这些草地的光照、温度和湿度条件介于低郁闭度疏林草地和高郁闭度疏林草地之间,导致这些草地的物种组成和生态功能也介于这两种类型之间。例如,这些草地既有能够在阳光充足条件下生存的植物种类,也有能够在阴暗条件下生存的植物种类。此外,这些草地的土壤属性和生态指标也受到冠层郁闭度的影响。

我国北方的疏林草地主要分布在干旱/半干旱及其周边过渡地带,包括新疆的天山山脉、阿勒泰山脉、祁连山及其周边地区,还包括陕西北部的黄土高原和山西部分地区。其中,低郁闭度疏林草地面积相对较少,而中郁闭度疏林草地的分布则相对广泛。

4)灌木林草地:灌木林草地是由灌木和草本植物共存构成,其结构、特性和形成机制受到多种环境因素的影响,广泛分布于热带、亚热带和温带地区的干旱/半干旱地区。这种生态系统不仅在结构和功能上具有过渡性质,其形成机制和维持机制反映了气候、土壤、地形、火等多种环境因子的共同作用^[75]。在一定的环境压力下,灌木相对于乔木和草本植物,具有更强的抗逆性和竞争优势,从而在该生态系统中占据主导地位^[76]。此外,适度火烧对灌木林草地的形成和维持也起着重要作用。一方面,火烧抑制了乔木的生长,为灌木和草本植物提供了生存空间;另一方面连续的火烧对乔木的威胁更大,有助于稳定灌木—草本植物的共存格局^[77]。人类活动,如农业扩张和过度放牧,也可通过改变物种组成和竞争关系导致灌木林草地的结构和功能发生变化^[78]。

灌木林草地在生态系统中扮演着多重角色,不仅能够提供丰富的生物多样性,支持多种动植物生存,还有助于土壤的稳定和水土保持。虽然灌木在一定程度上降低了草地的放牧潜力,但其根系对土壤的稳定和水土保持具有积极作用^[79]。灌木的枝叶为土壤提供遮阴,有助于减缓水分蒸发和保持水土,为多种动植物提供栖息地和食物来源,尤其是那些在不同生态系统间迁徙的物种。灌木与草之间的相互作用能够加强和放大由放牧和干旱引起的生物和非生物反馈,从而影响草地向灌木林的转变^[80]。因此,在管理灌木林草地时,应考虑灌木与草地之间的相互作用。这些相互作用可能是竞争性的,也可能是互利共生的,需要在保护和利用之间寻求平衡。适当的灌木密度和分布控制可以同时维护草地的放牧价值和土壤的稳定^[81]。

根据地理位置和环境条件,灌木林草地可分为 3 个亚类:山地灌木林草地、沙地灌木林草地和其他灌木林草地(图 4)。

山地灌木林草地的生态特性很大程度上受到地形特征的影响,如坡度、海拔和坡向。坡度和坡向会影响阳光照射的强度和持续时间,进而影响温湿度条件。此外,山地的土壤通常具有较高的石质含量和较低的肥力,影响其物种组成和生态功能。

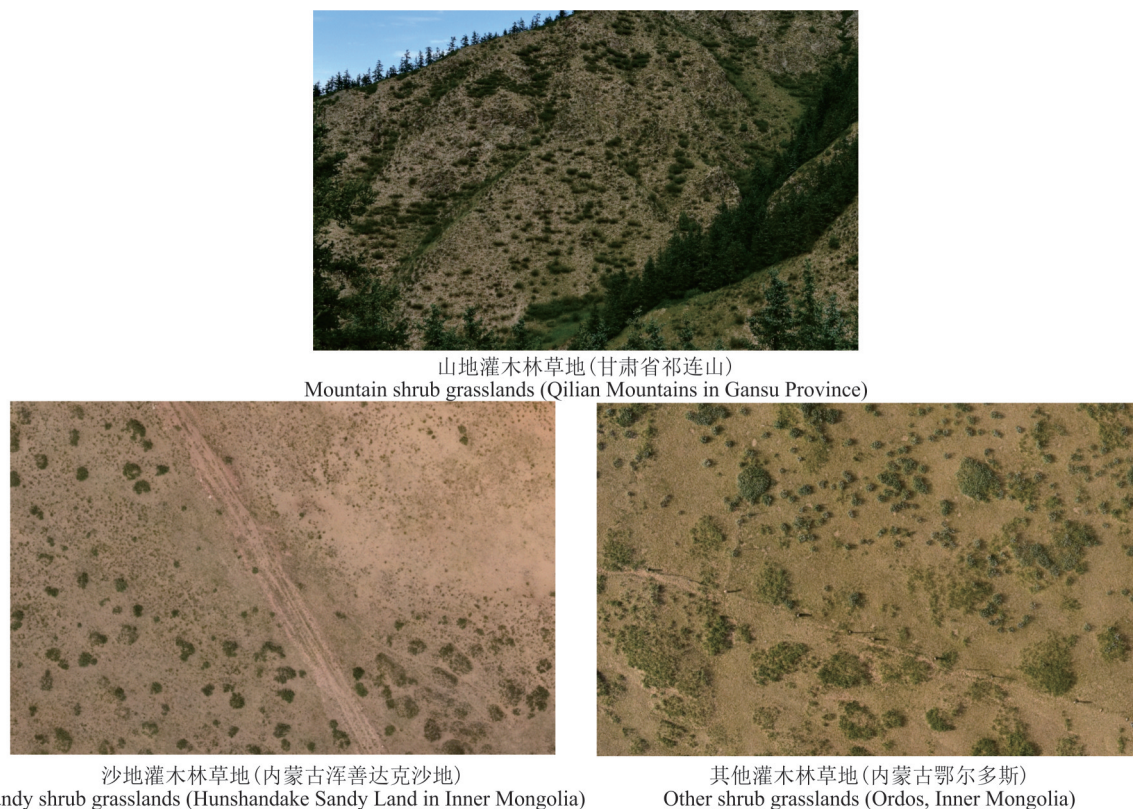


图4 灌木林草地

Fig. 4 Shrub grasslands

沙地灌木林草地的生态特性主要取决于土壤特性,如颗粒大小、排水能力和肥力。沙地土壤通常具有较好的排水能力但肥力较低,因此沙地灌木林草地的物种组成偏向于耐旱和耐盐碱类型。

我国灌木林草地广泛分布于新疆北部阿尔泰山地、天山西部山地、阿尔金山与昆仑山北麓干旱绿洲、甘肃祁连山区以及内蒙古森林草原交错区。这些地区多属于干旱半干旱地区,气候类型为大陆性气候,年降水量少且季节分配不均。

3 讨论与结论

3.1 讨论

1)概念的普遍性和深入理解:林间草地作为一种特殊的生态系统类型,在不同地理环境和生态条件下广泛存在,但其具体定义和理解在不同文化和学科背景下存在差异。为了推进林间草地研究的普遍性和深入理解,必须采取多学科、跨区域的研究方法,结合生态学、地理学、土地科学等多个学科的理论和方法,系统地分析和总结林间草地的基本特征和功能。此外,加强国际合作,借鉴和参考国际上关于类似生态系统的研究成果,可以为我国林间草地概念的普遍性和深入理解提供重要参考。

2)分类体系的量化和标准化:分类体系的量化和标准化是提高林间草地研究科学性的关键。尽管林间草地分类体系的研究已经取得了一些进展,但仍然面临一些挑战。在当前的分类体系中,部分指标设定是基于一定的野外观测和主观经验,但在不同生态系统和地理环境下,这些设定可能存在差异。为了进一步提高分类体系的科学性和实用性,未来的研究需要在以下几个方面做出努力:基于充分的实地调查数据和生态学理论,制定统一的野外调查技术规范和分析流程;利用遥感等现代生态学技术手段,结合实地调查数据,支持和完善林间草地分类标准的量化;根据生境类型的差异和异质性特征,优化调整相关分类指标和阈值范围的设定。

总体而言,构建和不断完善林间草地分类体系,对于推动林草融合发展战略具有重要意义,不仅能增强对这些复杂生态系统的理解,还能为生态保护、资源管理和区域可持续发展提供科学依据和指导。

3.2 结论

林间草地作为林地和草地耦合而成的具有独特生态特征的复杂生态系统,其典型特征是草本植物与木本植物共生。本研究深入探讨了林间草地的概念、内涵及其生态特点,并结合实地调查和观测数据,提出了具有一定普适性的林间草地定义,即林间草地是指在森林分布区,生长于大面积森林内部或边缘的成片草地,以及与稀疏林木或灌木相间生长的区域。

在充分考虑我国北方林间草地分布的地理环境特征、可利用性及其在中、高空间分辨率遥感影像中的可辨识性基础上,研究提出了我国北方林间草地分类体系,该体系包含林窗草地、林缘草地、疏林草地和灌木林草地4个类型及12个亚类。

林间草地科学定义和分类体系的提出,不仅为相关领域的研究者提供了一个明确、系统的参考框架,而且有助于更好地了解和管理这些生态系统,为实现可持续发展和生态保护提供支持。在今后的研究中,将继续优化和完善林间草地分类体系,以更好地服务于实践和研究。

参考文献 References:

- [1] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, *et al.* Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 718—728.
- [2] Nie H Y, Gao J X. Research progress on the ecological impact and spreading mechanism of weeds on degraded grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(7): 101—113.
聂华月, 高吉喜. 退化草地杂草生态影响及蔓延机制研究进展. *中国草地学报*, 2022, 44(7): 101—113.
- [3] Li L H, Xin X P, Tang H J, *et al.* China's meadow grasslands: Challenges and opportunities. *Plant and Soil*, 2022, 473(1): 89—98.
- [4] Sagar R, Li G Y, Singh J S, *et al.* Carbon fluxes and species diversity in grazed and fenced typical steppe grassland of Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 12(1): 10—22.
- [5] Yin Y T, Hou X Y, Yun X J. Advances in the climate change influencing grassland ecosystems in Inner Mongolia. *Pratacultural Science*, 2011, 28(6): 1132—1139.
尹燕亭, 侯向阳, 运向军. 气候变化对内蒙古草原生态系统影响的研究进展. *草业科学*, 2011, 28(6): 1132—1139.
- [6] Liu X D, Ma Q H, Yu H Y, *et al.* Climate warming-induced drought constrains vegetation productivity by weakening the temporal stability of the plant community in an arid grassland ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 307: 108526.
- [7] Meng L, Mao P C, Zheng M L, *et al.* Review of grassland ecological function under the compound planting pattern of forest and grass. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2021, 42(4): 1—5.
孟林, 毛培春, 郑明利, 等. 浅析林草复合种植模式下的草地生态功能. *草学*, 2021, 42(4): 1—5.
- [8] Wang Y S. Protect grasslands, build grasslands. *Plant Journal*, 1979, 6(6): 35—36.
王昱生. 保护草原建设草原. *植物杂志*, 1979, 6(6): 35—36.
- [9] Sun X. Investigation and research on forest and grass intercropping. *Chinese Journal of Grassland*, 1983, 5(4): 50—54.
孙祥. 林草间作的调查研究. *中国草原*, 1983, 5(4): 50—54.
- [10] Sun X. Research on forest and grass intercropping. *Forest Science and Technology*, 1985, 28(1): 20—23.
孙祥. 关于林草间作的研究. *林业科技通讯*, 1985, 28(1): 20—23.
- [11] Lu D R, Zhang J. An assessment of grassland of Xunyi sheep station of Shaanxi Province and the plan and it's implementation of establishment of 10000-mu artificial grassland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1986, 4(3): 13—23.
卢得仁, 张军. 陕西省旬邑羊场草地资源评价及万亩人工草地建设的规划与实施. *干旱地区农业研究*, 1986, 4(3): 13—23.
- [12] Li Y T. Develop the grass industry in forested areas. *Pratacultural Science*, 1988, 5(3): 1—4.
李毓堂. 发展林区草业. *中国草业科学*, 1988, 5(3): 1—4.
- [13] Zhang C J. Firstly, utilization and secondly construction of grassland resources in western Fujian. *Issues in Agricultural Economy*, 1982, 3(12): 47—51.
张长江. 对闽西草山草坡资源一要利用二要建设. *农业经济问题*, 1982, 3(12): 47—51.
- [14] Li Y T. Grassland legislation and grassland management. *Chinese Journal of Grassland*, 1985, 7(3): 1—5.

- 李毓堂. 草地立法和草地管理. 中国草原, 1985, 7(3): 1—5.
- [15] Erasmí S, Klinge M, Dulamsuren C, *et al.* Modelling the productivity of Siberian larch forests from landsat NDVI time series in fragmented forest stands of the Mongolian forest-steppe. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(4): 200.
- [16] Erdős L, Ambarlı D, Anenkhonov O A, *et al.* The edge of two worlds: A new review and synthesis on Eurasian forest-steppes. *Applied Vegetation Science*, 2018, 21(3): 345—362.
- [17] Magyari E K, Chapman J C, Passmore D G, *et al.* Holocene persistence of wooded steppe in the Great Hungarian Plain. *Journal of Biogeography*, 2010, 37(5): 915—935.
- [18] Baker T P, Marais Z E, Davidson N J, *et al.* The role of open woodland in mitigating microclimatic extremes in agricultural landscapes. *Ecological Management & Restoration*, 2021, 22(1): 118—126.
- [19] Taft J B. Savanna and open-woodland communities//Conservation in highly fragmented landscapes. New York: Springer, 1997: 24—54.
- [20] Bergmeier E, Petermann J, Schröder E. Geobotanical survey of wood-pasture habitats in Europe: Diversity, threats and conservation. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(11): 2995—3014.
- [21] Jose S, Dollinger J. Silvopasture: A sustainable livestock production system. *Agroforestry Systems*, 2019, 93(1): 1—9.
- [22] Orefice J, Carroll J, Conroy D, *et al.* Silvopasture practices and perspectives in the Northeastern United States. *Agroforestry Systems*, 2017, 91(1): 149—160.
- [23] Ferraz-de-Oliveira M I, Azeda C, Pinto-Correia T. Management of Montados and Dehesas for high nature value: An interdisciplinary pathway. *Agroforestry Systems*, 2016, 90(1): 1—6.
- [24] van Noordwijk M. Agroforestry-based ecosystem services: Reconciling values of humans and nature in sustainable development. *Land*, 2021, 10(7): 699.
- [25] Jia S X. Discussion on classification of grassland types in China. *Chinese Journal of Grassland*, 1980, 2(1): 1—13.
贾慎修. 中国草原类型分类的商讨. 中国草原, 1980, 2(1): 1—13.
- [26] Chen A R. Analysis of forage resources and grassland types in Shanxi Province. *Resources Science*, 1983, 7(3): 54—61.
陈安仁. 山西省的牧草资源及草地类型分析. 自然资源, 1983, 7(3): 54—61.
- [27] Yang R R. Grassland resources and rational utilization in Nanling Mountains. *Chinese Journal of Grassland*, 1988, 10(1): 6—10.
杨汝荣. 南岭山区的草地资源及合理利用. 中国草原, 1988, 10(1): 6—10.
- [28] Gao W, Xiang G Q, Yang Z J. Forest grassland and shrubland on the northern slope of Changbai Mountain—A study on the structure of bird communities in summer. *Chinese Journal of Wildlife*, 1989, 11(3): 13—14.
高玮, 相桂权, 杨志杰. 长白山北坡林间草地灌丛—夏季鸟类群落结构的研究. 野生动物, 1989, 11(3): 13—14.
- [29] Bao W K, Wu N. Human-induced disturbance on alpine and sub-alpine meadow and its aftereffects in Deqin County of the Northwestern Yunnan Province. *Chinese Journal of Grassland*, 2003, 24(2): 2—9.
包维楷, 吴宁. 滇西北德钦县高山、亚高山草甸的人为干扰状况及其后果. 中国草地, 2003, 24(2): 2—9.
- [30] Bai H Q, Wen Y F. Problems and development strategies for grazing utilization of forest grasslands in southern China. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2007, 28(8): 53—55.
白慧强, 文亦芾. 我国南方林间草地放牧利用存在的问题及发展对策. 草业与畜牧, 2007, 28(8): 53—55.
- [31] Lei C F, Shangguan T L, Zhao B Q, *et al.* Diversity analysis of harvesting on *Pinus tabulaeformis* inter forest grassland in Lingkong Mountain. *Pratacultural Science*, 2014, 31(11): 2060—2068.
雷彩芳, 上官铁梁, 赵冰清, 等. 灵空山采伐干扰下油松林林间草地物种多样性分析. 草业科学, 2014, 31(11): 2060—2068.
- [32] Erdős L, Török P, Veldman J W, *et al.* How climate, topography, soils, herbivores, and fire control forest-grassland coexistence in the Eurasian forest-steppe. *Biological Reviews*, 2022, 97(6): 2195—2208.
- [33] Erdős L, Tölgyesi C, Horzse M, *et al.* Habitat complexity of the Pannonian forest-steppe zone and its nature conservation implications. *Ecological Complexity*, 2014, 17: 107—118.
- [34] House J I, Archer S, Breshears D D, *et al.* Conundrums in mixed woody-herbaceous plant systems. *Journal of Biogeography*, 2003, 30(11): 1763—1777.
- [35] Walter H, Breckle S W. Ecological systems of the geobiosphere: 3 temperate and polar zonobiomes of northern Eurasia. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2012: 129—139.
- [36] Breshears D D. The grassland-forest continuum: Trends in ecosystem properties for woody plant mosaics. *Frontiers in Ecology*

- and the Environment, 2006, 4(2): 96–104.
- [37] Manning A D, Gibbons P, Lindenmayer D B. Scattered trees: A complementary strategy for facilitating adaptive responses to climate change in modified landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(4): 915–919.
- [38] Schmidt M, Lischied G, Nendel C. Microclimate matters: Dynamics of tree cover transition zones in tropical forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 1–10.
- [39] Scholes R J, Archer S R. Tree-grass interactions in savannas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28(1): 517–544.
- [40] Fensham R J, Fairfax R J, Archer S R. Rainfall, land use and woody vegetation cover change in semi-arid Australian savanna. *Journal of Ecology*, 2005, 93(3): 596–606.
- [41] Sturtevant B R, Hanberry B B. Processes underlying restoration of temperate savanna and woodland ecosystems: Emerging themes and challenges. *Forest Ecology and Management*, 2021, 481: 118681.
- [42] Wesche K, Ambarlı D, Kamp J, *et al.* The Palearctic steppe biome: A new synthesis. *Biodiversity and Conservation*, 2016, 25(12): 2197–2231.
- [43] Bartha S, Campetella G, Kertész M, *et al.* Beta diversity and community differentiation in dry perennial sand grasslands. *Annali Di Botanica*, 2011, 1: 9–18.
- [44] Plieninger T, Flinzerberger L, Hetman M, *et al.* Dehesas as high nature value farming systems: a social-ecological synthesis of drivers, pressures, state, impacts, and responses. *Ecology and Society*, 2021, 26(3): 23.
- [45] Garrido P, Edenius L, Mikusiński G, *et al.* Experimental rewilding may restore abandoned wood-pastures if policy allows. *Ambio*, 2021, 50(1): 101–112.
- [46] Rackham O. Ancient woodlands: Modern threats. *New Phytologist*, 2008, 180(3): 571–586.
- [47] Jose S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 2009, 76(1): 1–10.
- [48] Nair P K R, Kumar B M, Nair V D. Definition and concepts of agroforestry//An introduction to agroforestry: Four decades of scientific developments. Cham, Switzerland: Springer, 2021: 21–28.
- [49] Nair P K R, Kumar B M, Nair V D. Classification of agroforestry systems//An introduction to agroforestry: Four decades of scientific developments. Cham, Switzerland: Springer, 2021: 29–44.
- [50] Ren J Z. Agronomic meaning of forest–grassland ecosystem. *Pratacultural Science*, 1989, 6(4): 1–4.
任继周. 森林–草地生态系统的农学含义. *草业科学*, 1989, 6(4): 1–4.
- [51] Song Z M, Meng P. The structure and pattern of agroforestry in China. *World Forestry Research*, 1993, 6(5): 77–82.
宋兆民, 孟平. 中国农林业的结构与模式. *世界林业研究*, 1993, 6(5): 77–82.
- [52] Hanberry B B, Bragg D C, Hutchinson T F. A reconceptualization of open oak and pine ecosystems of eastern North America using a forest structure spectrum. *Ecosphere*, 2018, 9(10): e02431.
- [53] Bullock J M, Hill B C, Silvertown J, *et al.* Gap colonization as a source of grassland community change: Effects of gap size and grazing on the rate and mode of colonization by different species. *Oikos*, 1995, 72(2): 273–282.
- [54] Muscolo A, Bagnato S, Sidari M, *et al.* A review of the roles of forest canopy gaps. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(4): 725–736.
- [55] Yamaura Y, Narita A, Kusumoto Y, *et al.* Genomic reconstruction of 100000-year grassland history in a forested country: Population dynamics of specialist forbs. *Biology Letters*, 2019, 15(5): 20180577.
- [56] King T J. The roles of seed mass and persistent seed banks in gap colonisation in grassland. *Plant Ecology*, 2007, 193: 233–239.
- [57] Bengtsson J, Nilsson S G, Franc A, *et al.* Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests. *Forest Ecology and Management*, 2000, 132(1): 39–50.
- [58] Attiwill P M. The disturbance of forest ecosystems: The ecological basis for conservative management. *Forest Ecology and Management*, 1994, 63(2/3): 247–300.
- [59] Geraskina A P, Tebenkova D N, Ershov D V, *et al.* Wildfires as a factor of loss of biodiversity and forest ecosystem functions. *Forest Science Issues*, 2022, 5(1): 1–70.
- [60] McCarthy J. Gap dynamics of forest trees: A review with particular attention to boreal forests. *Environmental Reviews*, 2001, 9(1): 1–59.
- [61] Van Vooren L, Reubens B, Broekx S, *et al.* Assessing the impact of grassland management extensification in temperate areas

- on multiple ecosystem services and biodiversity. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 267: 201–212.
- [62] Hisano M, Searle E B, Chen H Y H. Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 2018, 93(1): 439–456.
- [63] Cadenasso M L, Pickett S T, Weathers K C, *et al.* A framework for a theory of ecological boundaries. *BioScience*, 2003, 53(8): 750–758.
- [64] Harper K A, Macdonald S E, Burton P J, *et al.* Edge influence on forest structure and composition in fragmented landscapes. *Conservation Biology*, 2005, 19(3): 768–782.
- [65] Bátori Z, Erdős L, Kelemen A, *et al.* Diversity patterns in sandy forest-steppes: A comparative study from the western and central Palaearctic. *Biodiversity and Conservation*, 2018, 27(4): 1011–1030.
- [66] Ries L, Fletcher R J, Battin J, *et al.* Ecological responses to habitat edges: Mechanisms, models, and variability explained. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 2004, 35(1): 491–522.
- [67] Walkiewicz A, Bulak P, Khalil M I, *et al.* Variability in soil CO₂ fluxes across a range of forest types and edaphic conditions// EGU General Assembly Conference abstracts. Vienna: European Geosciences Union, 2021: 2530.
- [68] Parui A K, Chatterjee S, Basu P. Habitat characteristics shaping ant species assemblages in a mixed deciduous forest in Eastern India. *Journal of Tropical Ecology*, 2015, 31(3): 267–280.
- [69] Gaumont-Guay D, Black T A, McCaughey H, *et al.* Soil CO₂ efflux in contrasting boreal deciduous and coniferous stands and its contribution to the ecosystem carbon balance. *Global Change Biology*, 2009, 15(5): 1302–1319.
- [70] Hoffmann W A, Geiger E L, Gotsch S G, *et al.* Ecological thresholds at the savanna-forest boundary: How plant traits, resources and fire govern the distribution of tropical biomes. *Ecology Letters*, 2012, 15(7): 759–768.
- [71] Maracahipes L, Carlucci M B, Lenza E, *et al.* How to live in contrasting habitats? Acquisitive and conservative strategies emerge at inter- and intraspecific levels in savanna and forest woody plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2018, 34: 17–25.
- [72] Homewood K, Brockington D. Biodiversity, conservation and development in Mkomazi game reserve, Tanzania. *Global Ecology and Biogeography*, 1999, 8(3/4): 301–313.
- [73] Lehmann C E R, Archibald S A, Hoffmann W A, *et al.* Deciphering the distribution of the savanna biome. *The New Phytologist*, 2011, 191(1): 197–209.
- [74] Mabry C M, Brudvig L A, Atwell R C. The confluence of landscape context and site-level management in determining Midwestern savanna and woodland breeding bird communities. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(1): 42–51.
- [75] Nano C E M, Clarke P J. Woody-grass ratios in a grassy arid system are limited by multi-causal interactions of abiotic constraint, competition and fire. *Oecologia*, 2010, 162(10): 719–732.
- [76] Pierce N A, Archer S R, Bestelmeyer B T. Competition suppresses shrubs during early, but not late, stages of arid grassland-shrubland state transition. *Functional Ecology*, 2019, 33(8): 1480–1490.
- [77] Wilcox B P, Birt A, Fuhlendorf S D, *et al.* Emerging frameworks for understanding and mitigating woody plant encroachment in grassy biomes. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 32: 46–52.
- [78] Grover H D, Musick H B. Shrubland encroachment in southern New Mexico, USA: An analysis of desertification processes in the American southwest. *Climatic Change*, 1990, 17(2): 305–330.
- [79] Kooch Y, Noghre N. The effect of shrubland and grassland vegetation types on soil fauna and flora activities in a mountainous semi-arid landscape of Iran. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135497.
- [80] Pierce N A, Archer S R, Bestelmeyer B T, *et al.* Grass-shrub competition in arid lands: An overlooked driver in grassland-shrubland state transition. *Ecosystems*, 2019, 22(3): 619–628.
- [81] Nicholas A M M, Franklin D C, Bowman D M J S. Coexistence of shrubs and grass in a semi-arid landscape: A case study of mulga (*Acacia aneura*, Mimosaceae) shrublands embedded in fire-prone spinifex (*Triodia pungens*, Poaceae) hummock grasslands. *Australian Journal of Botany*, 2009, 57(5): 396–405.