

· 研究进展 ·

草地生态系统保护、修复与功能提升的关键科学问题^{*}

朱剑霄¹ 尚占环² 蒋胜竞¹ 师研¹ 冯琦胜¹
赵新全³ 辛晓平⁴ 闫玉春⁴ 苏艳军⁵ 贺金生^{1* *}

1. 兰州大学 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室 草地农业科技学院, 兰州 730020
2. 兰州大学 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室 生态学院, 兰州 730000
3. 青海大学 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016
4. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081
5. 中国科学院 植物研究所, 北京 100093

[摘要] 草地占我国国土面积的 27.6%, 在保障我国生态安全中发挥着重要作用。本文梳理了我国从单一追求草地资源的物质生产功能, 到生产和生态兼顾, 再到目前的生态优先、多功能目标管理的发展历程, 分析了草地保护与修复政策施力点及其在遏制草地退化中的作用, 分析了我国草地修复过程中的乡土草种质资源、土壤养分和土壤微生物等制约因素, 介绍了依靠自然过程, 将退化草地恢复到生物多样性、稳定性与地带性群落接近的草地近自然恢复理念与途径; 凝练了我国草地保护和修复亟需解决的关键科学问题。建议在新时代草地保护与修复政策的保障下, 尊重自然、顺应自然、践行近自然恢复理念, 引领新时代由植被到生态系统的草地保护与修复工作。

[关键词] 重点生态保护和修复工程; 退化草地; 乡土草种; 土壤养分; 土壤微生物; 近自然恢复

草地是全球最大的陆地生态系统, 各类草地总面积超过 52 亿公顷, 约占全球冰盖以外陆地总面积的 40%^[1], 其中天然草地约占陆地总面积的 1/4^[2]。草地为全人类提供草畜产品的同时, 兼具生物多样性保育、水土保持、水源涵养、气候调节、固碳等诸多生态系统功能, 是维系区域和全球生态安全的重要植被类型和天然屏障^[3]。伴随人们日益增长的畜产品需求, 一味追求草地的生产功能, 导致草地过度利用或被开垦, 造成草地退化及其生态功能的持续降低, 已成为全球普遍存在的问题^[4]。基于此, 各国政府均意识到合理利用草地资源, 加强草地保护与管理, 推进退化草地生态系统修复势在必行。明晰各类草地保护、修复及生态系统功能提升的制约因素和关键科学问题, 成为当下草业科学和恢复生态学研究的核心理论。



贺金生 兰州大学草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室主任, 北京大学教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 国家 973 计划、重点研发计划项目首席科学家。主要从事全球变化生态学、生物多样性、草地近自然恢复等方面的教学和科研工作。在 *PNAS*、*Nature Communications*、*Ecology* 等国际刊物发表论文 200 余篇。兼任国务院学位委员会第八届学科评议组(草学)召集人、中国草学会副理事长、中国生态学会常务理事等。



朱剑霄 兰州大学草地农业科技学院教授, 国家优秀青年科学基金获得者, 甘肃省领军人才。主要从事碳循环与生态恢复研究工作。在 *Nature Communications* 等学术期刊发表论文 40 余篇。获北京市自然科学奖一等奖(排名第五)、甘肃省青年科技奖。

收稿日期: 2023-08-14; 修回日期: 2024-01-10

^{*} 本文根据国家自然科学基金委员会第 313 期“双清论坛”讨论的内容整理。

^{**} 通信作者, Email: jshe@pku.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(32122061)的资助。

1 我国草地退化现状

我国草地资源丰富。最新的第三次全国国土调查明确我国草地面积为 2.65 亿公顷, 占国土总面积的 27.6%。我国草地涵盖 18 个大类, 以温性草原、低地草甸、山地草甸、高寒草原、高寒草甸和温性荒漠等类型为主, 这些类型构成了我国天然草地的主体(图 1)^[5]。保护我国天然草地的生物多样性、结构完整性, 修复退化草地、促进其生态系统功能提升, 对于我国生态文明建设, 保障国家生态安全具有举足轻重的作用。

依据 2021 年国家林业和草原局发布数据, 我国草地持续退化已初步遏制, 但仍有约 70% 的草地处于不同程度退化状态, 其中约 1/3 处于中度和重度退化^[6, 7]。草地退化首先表现为植物优势种显著改变, 多样性降低、盖度和生产力下降等植被退化现象。随后出现, 土壤理化性质发生变化, 沙化或盐碱化, 土壤养分含量下降, 微生物群落组成和结构趋向简单化等土壤退化现象^[8]。

除过度放牧、草地开垦等人类活动以外, 气候变化在一定程度上加剧了一些地区的草地退化, 例如, 三江源“黑土滩”次生裸地、青海湖以东的沙化草地, 巴音布鲁克沙化和毒杂草草地, 位于科尔沁、浑善达

克沙地的西辽河平原流动沙地, 以及锡林郭勒以西严重退化的温性草原、鄂尔多斯和阿拉善的荒漠草原, 退化现状仍然严峻^[11-14]。此外, 西藏—江两河河谷地区的沙化和毒杂草草地以及中国南方地区的喀斯特石漠化草地等均在气候变化的影响下趋于严重退化^[15, 16]。

针对这些严重退化草地, 各地区采取不同措施促进草地恢复, 其中传统的恢复方式包括自然(通过草地自然演替实现自我恢复)、人工辅助修复(通过人为播种、施肥或草皮移植等手段辅助草地修复)以及生态工程修复。但通常恢复草地群落构建单一, 导致其抗干扰能力较弱以及生态系统稳定性较差, 很难满足恢复草地在生产和生态功能的可持续性^[17]。

2 我国草地保护与修复历程

我国草地管理、保护与修复历程大致可以分为四个阶段: 20 世纪 70 年代以前以实现“人畜两旺”为目标的草地管理起步时期、80 年代和 90 年代致力于生产力恢复的草地保护与管理时期、21 世纪前十年的全面推进草地保护与修复工程建设时期以及 2012 年以来的生态文明思想引领草地保护与修复的新时期(图 2)。

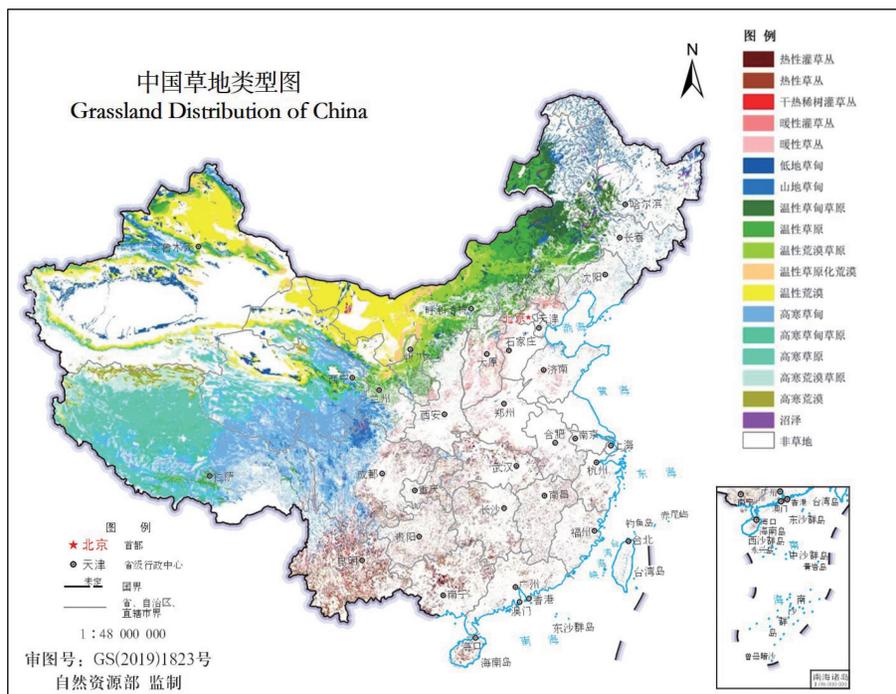


图 1 中国草地类型分布图

注: 根据《中国草地资源》^[9] 提出的中国草地类型分类系统, 将我国草地划分为十八类, 包括热性灌草丛、热性草丛、干热稀树灌草丛、暖性灌草丛、暖性草丛、低地草甸、山地草甸、温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原、温性草原化荒漠、温性荒漠、高寒草甸、高寒草甸草原、高寒草原、高寒荒漠草原、高寒荒漠和沼泽。草地类型依据中国 1:1 000 000 草地资源图^[10] 重绘。

新中国成立初期,为改变“靠天养畜”的草原管理状况,内蒙古自治区政府于1953年开始提倡定居游牧^[18],为我国草原政策的开端。之后我国尝试大力推广“草库伦”建设,并在1978年相继提出“草场围栏”“人工草场建设”试点、三北草牧场防护林工作,然而在本时期,我国北方草地面积减小、草原退化、草畜矛盾等问题初露端倪^[19]。

改革开放以来,草地生态环境形势十分严峻。俄怕了的“粮食情结”打破了草地与耕地之间的平衡。我国草地面积不断减少、质量不断下降,普遍超载过牧,草地退化、沙化、盐渍化问题严重。为恢复草地生产力,我国开始建立草地相关保护区并开始制定草地保护相关政策法规。1982年,我国第一个草原保护区宁夏固原县云雾山草原自然保护区成立^[20];1984年,我国牧区开始实施“草畜双承包”责任制^[21];1985年通过了《草原法》,标志着我国草地保护利用政策规范与管理体制体系开始构建;1991年提出建设草原管理监理体系,省、地、县三级监理体系初步形成;1992年,草原有偿使用制度开始实行,形成了长效稳固的草原建设投入机制。本时期我国草地保护政策充分结合国情开展,草地生产力退化现象得到一定遏制。

21世纪以来,一系列草地保护与修复工程启动。2002年确定实施“退耕还草”工程,随后新修订

《草原法》;天然草原植被恢复、草原围栏建设、退耕还草、京津风沙源治理、草种基地建设等一系列草地生态建设工程相继实施,并于2005年启动“草原生态保护和建设工程”;2003年,农业部正式成立草原监理中心,全国草原监理体系基本建成。这一时期,政策导向从以生产为主向生产与生态并重以及生态优先的政策转变,我国草地生态功能退化放缓。从总体来看,实施生态修复区水土流失得到控制,灌草植被覆盖度增加,生物多样性丧失得到扭转,生态环境整体得到改善^[22]。

中国共产党第十八次全国代表大会提出“把生态文明建设放在突出地位”,并于2018年正式明确习近平生态文明思想,成为引领新时代全国生态环保工作的行动指南。2020年提出《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》;2021年提出“完善草原保护与修复制度、推进草原治理体系和治理能力现代化”的具体措施,并提出推进生态产业化和产业生态化的实现路径与机制。新时代立足人与自然和谐共生,对我国草地生态功能的保护与修复获得前所未有的重视。以祁连山青海片区生态修复试点为例,自祁连山生态保护工程实施以来,有效恢复了该地区约60%的草地,植被盖度增加约1.45%,空气质量显著提升,生物多样性显著提高^[23]。在草地保护和修复较为困难的

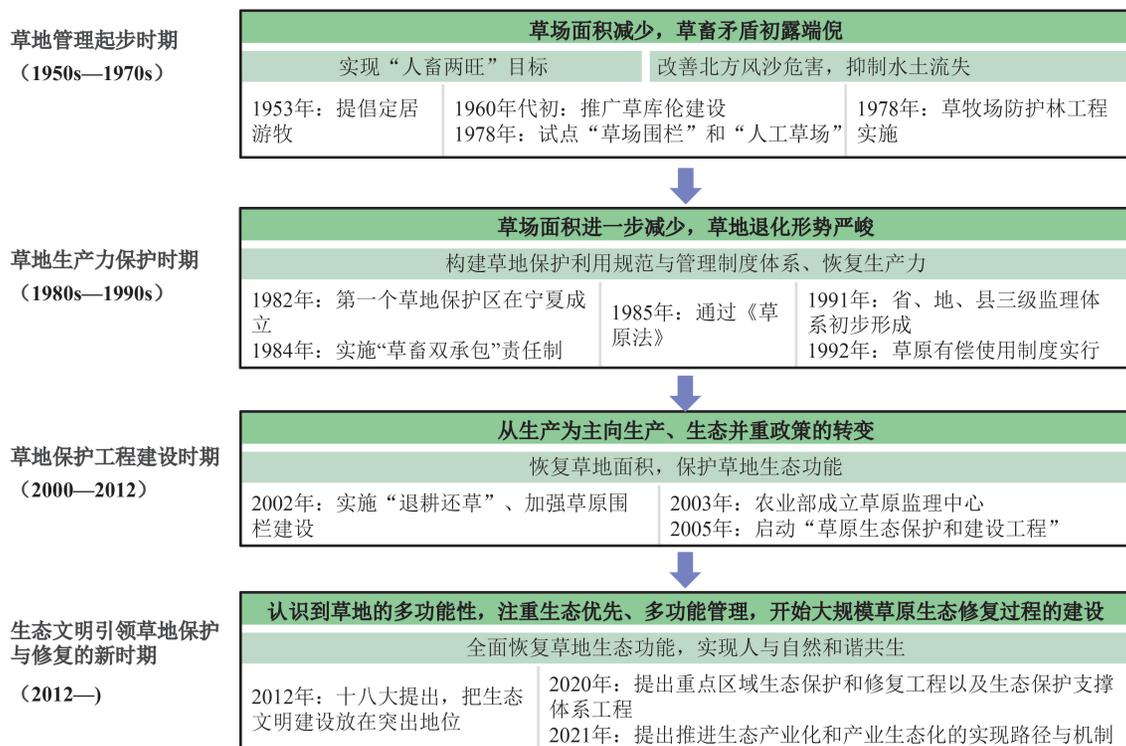


图2 我国草地保护与修复历程

地区,针对性部署了保护和修复方案。如 2015 年 12 月,习近平总书记主持召开中央全面深化改革领导小组第十九次会议,审议通过了《中国三江源国家公园体制试点方案》。2018 年 1 月,国家发展改革委正式公布《三江源国家公园总体规划》。此后,三江源地区生态保护和修复统筹推进,生态修复成效逐步显现。综上,在这一全新时期,草地保护与修复工作者应通过对影响草地修复制约因素的调控,辅助草地植被和土壤修复进程更加接近自然状态、更有效地修复群落生物多样性及稳定性,从而更好地维持生态系统功能以及提高生态系统多服务性^[17]。

3 我国草地生态系统修复的关键制约因子

不同类型和退化状态下草地生态系统修复的制约因子不同^[24, 25],查明这些关键制约因子,并研究如何解决或降低限制程度来调控草地生态系统的修复过程,达到生产和生态功能的协调发展和自我维持,从而实现生态系统恢复的可持续性就显得尤为重要。以青藏高原高寒草地为例,科研工作者基于生态学理论,提出该区域高寒草地修复应遵循通过乡土草种组配和补播、辅以土壤养分和微生物调控等措施,促进退化草地生态系统演替到植物群落和土壤微生物群落组成、结构与地带性群落相接近的“近自然恢复理念”^[8, 17]。由于植物多样性较高的植物群落,其生态系统通常拥有更高的抵御力与稳定性^[26],相较于草地植被覆盖度恢复的“复绿工程”,“近自然恢复”更加重视并促进植物群落多样性的保护和修复,努力实现草地生态系统结构与功能的全面恢复^[27, 28]。此外,在退化草地修复过程中,如仅对草地进行补播或人工草地建植,而忽视土壤养分和微生物群落的同步修复,植被生产力虽可能迅速提高,但退化的土壤养分和微生物结构特征不足以支持植物群落可持续性建植,即恢复后的生态系统稳定性差。因此,将“近自然恢复理念”应用于我国草地生态系统保护与修复,需要将“植被—土壤—微生物”作为一个整体进行考虑,而解决乡土草种质资源(植物制约)、土壤养分和微生物(土壤制约),就成为我国草地生态系统恢复的关键制约因子^[17]。

3.1 乡土草种质资源

在草地保护过程中,开展围栏封育、轮牧等措施,依靠自然演替促进自然更新,可使草地生产力和

其他生态功能逐渐恢复。这种通过对草地施加保护措施而实现自然恢复的方法,也可用于退化草地的恢复,但自然恢复过程通常较为漫长、恢复效果较差。除了自然恢复,人工干预也是常见的草地修复手段,例如免耕补播、人工草地建植等。然而,目前普遍的现状是重新建植的草地虽然在短期内得以修复但会二次退化。其原因可能是所使用的补播草种单一或草皮移植的草地群落组成和结构单一,导致修复后群落物种多样性低下,抗干扰能力不足,稳定性差,修复效果难以持续^[29]。

为提升修复效果的持续性,在退化草地的补播修复时,应播种适应本地环境的不同功能群草种,从而促进后续的群落构建和草地演替^[8],维系修复草地植物群落组成和结构,增强生态系统功能的稳定性^[30]。适宜的种源是建植成功和存续的前提。一般来说,选择种子应以来源于周边天然草地的乡土草种为宜。目前已实现商业化并大量应用于高寒草地的垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)等,应用于北方温性草原的羊草(*Leymus chinensis*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等草种,在退化草地复绿上起到了巨大作用。但这些种子多为禾本科草种,而豆科、莎草科和杂类草的草种子不易获取,且扩繁难度较高,导致非禾本科草种种源的缺乏,而这些非禾本科草种是“近自然恢复”必不可少的乡土草种。由于大多数乡土草种子不易获取,商业化草种较少,导致难以在实际修复中广泛应用^[31]。

因此,乡土草种质资源的缺乏已成为限制我国各地区草地生态系统恢复的关键制约因子,而实现乡土草种大规模采集、扩繁,获取更多优质乡土草种质资源是我们之后要关注的重点。

3.2 土壤养分

草地退化是植被和土壤的同步退化。草地补播修复或人工草地建植后,植被覆盖度和生产力虽可能迅速提高,但退化草地的土壤养分却未必能支持植物群落可持续性建植。通过施肥改善土壤养分状况来恢复退化草地的措施已相对成熟^[32],但由于不同类型和不同退化程度的草地养分状况存在较大的差异,通用施肥措施难以维系草地生态系统的可持续恢复。例如,一般认为中等程度的退化草地通常地上部的群落结构发生改变,草地生产力下降的同时,土壤养分含量也随之降低^[33],而青藏

高原地区的“黑土滩草地”地上部植被已完全丧失,但土壤养分含量仍然充足^[34]。因此,土壤养分的制约“因地制宜”,忽视草地土壤实际情况的施肥,并不适宜我国草地生态系统保护和修复的现状。

要实现根据草地土壤实际情况有针对性施肥,一要“探明病因”,即是否存在表层土壤有机质含量、土壤氮(N)和磷(P)等养分元素的含量不足或不匹配;二要“对症下药”,即在明确土壤养分限制情况后,针对性地通过科学定量的施肥补足养分短板和化学计量限制^[35]。最终实现在草地生态系统保护和恢复的整体过程中,遵循生态化学计量学的理论,明确限制性元素,制定合理的养分调控方案,从而使得退化草地土壤养分接近自然(退化前)状态,全面提升补播草地和人工建植草地的稳定性和可持续性^[36, 37]。

3.3 土壤微生物

土壤微生物能帮助植物吸收、转化和利用养分并抑制植物病害传播,从而影响植物群落的生长和建植,是促进草地土壤形成、演化和维持植物、土壤稳定的重要组分^[38-40]。其中,植物生长促进根际细菌(Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)可通过保护植物免受害虫、寄生虫或疾病的侵害来提高生产力^[41];丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)通过与植物根系形成菌根结构,增加土壤孔隙度,其菌丝网将土壤颗粒黏结形成团聚体,增强土壤结构稳定与抗侵蚀能力并促进植物对水分和养分吸收^[38, 39];外生菌根真菌(Ectomycorrhizal Fungi, EMF)与植物根系形成共生结构,通过菌丝网络增加土壤对植物的养分供应,促进草地生态系统的养分循环^[42];生物土壤结皮(Biological Soil Crusts, BSCs)中的蓝藻能够通过固氮和改善地表土壤结构来增加土壤养分可用性^[43],使土壤重新具备保水保肥能力^[40]。

由于土壤微生物对植物保护与修复具有重要作用,已有研究发现如果条件不利于土壤生物群的发展,退化生态系统的修复可能缓慢甚至失败^[44]。因此,草地生态系统的保护与修复中应同步开展土壤微生物群落组成和结构的保护与修复,这一修复理念逐渐成为学术界的共识^[13, 44, 45]。然而,在我国草地生态系统修复实践中,配置植物根际促生菌和菌根真菌等有益微生物制成的菌剂并将其通过种子包衣等方式施入退化草地中等技术仍有待完善,急需

明晰各类微生物在不同类型和退化程度草地生态系统中的作用,分离筛选来自不同类型、退化程度与植物根系及根际土壤的本土功能微生物菌株,研制适宜区域差异性的草地生态系统保护和修复系列微生物菌剂,破除影响我国草地保护与修复可持续性的土壤微生物制约因素。

综上,通过解决我国草地保护与修复中乡土草种质资源、土壤养分和微生物制约,可在草地修复中根据当地未退化的天然草地植物群落组成、土壤养分状况和土壤微生物特征,制定乡土草种混播、施肥和土壤微生物菌剂添加相结合的方式,依靠生态过程,帮助退化草地向天然草地演替,实现“近自然恢复理念”在我国草地生态系统恢复中的具体应用。

4 新时代草地修复、保护与功能提升的机遇与挑战

4.1 草地保护与修复的战略地位

草地是我国陆地生态系统的重要主体和生态文明建设的主战场之一,加强草地生态保护与修复,事关生态文明建设大局。近3年,习近平总书记在青海、西藏、内蒙古分别进行调研,对加强草地保护建设做出了重要指示,提出了一系列新理念、新思想、新要求,指出要坚持系统观念,扎实推进山水林田湖草沙一体化保护和系统治理;统筹森林、草原、湿地、荒漠生态保护与修复,加强治沙、治水、治山全要素协调和管理,着力培育健康稳定、功能完备的森林、草原、湿地、荒漠生态系统。在新时期,以恢复生态系统功能为目标的草地保护与修复工作获得了前所未有的政策保障。

4.2 草地保护与修复的政策引导

按照《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》和《生态保护和修复支撑体系重大工程建设规划(2021—2035年)》部署(图3),我国草地生态系统保护与修复的重点区域以青藏高原生态屏障区(高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠草原等)和北方防沙带(温性荒漠、温性荒漠草原、温性草原等)为主,在黄河重点生态区(温性草原化荒漠、温性荒漠草原、温性草原等)、长江重点生态区(热性草丛类、热性灌草丛类等)、东北森林带(低地草甸、温性草甸草原等)、南方丘陵山地带(低地草甸、暖性灌草丛类、暖性草丛类等)也有重要分布,这

些草地类型在不同的生态区和功能带发挥着生物多样性保育、水源涵养、水土保持、防风固沙、碳固存等重要的生态系统功能(表 1)。

4.3 草地保护与修复的科技支撑

随着我国草地保护与修复工作进入全新时期，政府和科研单位在推进草地保护与修复，构筑国家生态安全屏障做出巨大的努力。我国科技部在“十三五”和“十四五”期间，发布了国家重点研发计划“典型脆弱生态修复与保护研究”。该专项面向落实

我国生态文明建设、维持国家生态安全的总体需求，以典型脆弱生态区为重点区域，重点支持生态监测预警、荒漠化防治、水土流失治理、退化草地修复等技术研发与典型示范，几乎囊括了我国“三区四带”涉及的全部草地类型及主要生态系统功能(表 2)。目前，该专项已启动超过 40 余项涉及草地生态保护与修复的重点研发项目^[46]，研究地域遍布全国主要草地分布区，为科学指引、合理应用草地生态保护和修复技术提供了科技保障。

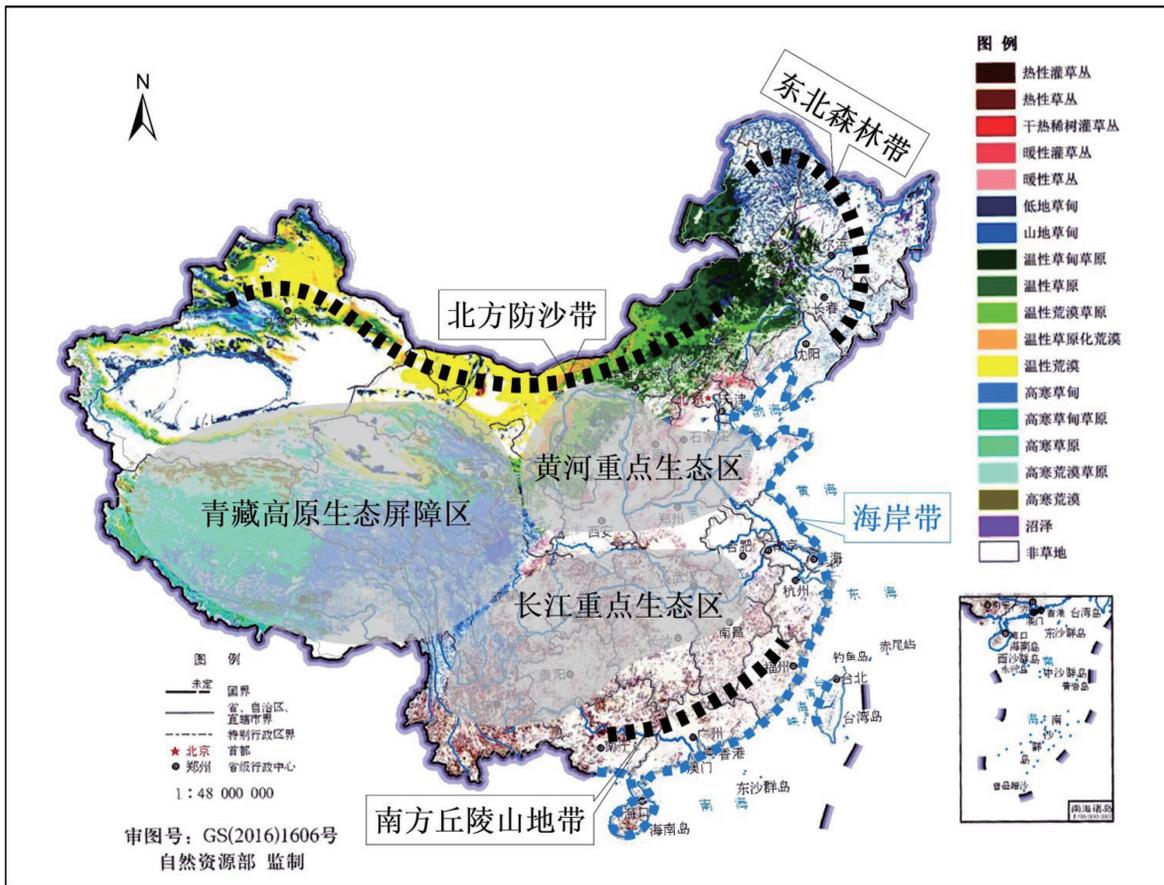


图 3 全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)重点区域分布

表 1 “三区四带”主要草地类型与主要生态系统功能

区域	主要草地类型	主要生态系统功能
青藏高原生态屏障区	高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠草原	生物多样性保育、水源涵养、碳固存
黄河重点生态区	温性草原化荒漠、温性荒漠草原、温性草原	水土保持、水源涵养
长江重点生态区	热性草丛类、热性灌草丛类	水源涵养、生物多样性保育、水土保持
南方丘陵山地带	低地草甸、暖性灌草丛类、暖性草丛类	水土保持、碳固存
北方防沙带	温性荒漠、温性荒漠草原、温性草原	防风固沙、水土保持、水源涵养
东北森林带	低地草甸、温性草甸草原	水源涵养、水土保持、生物多样性保育

表2 “十三五”期间国家重点研发项目及其服务的生态系统主要功能

区域	项目名称(项目编号)	重点关注的生态系统主要功能
青藏高原生态屏障区	典型高寒生态系统演变规律及机制(2016YFC0501800)	水源涵养、生物多样性保育等
	三江源区退化高寒生态系统恢复技术及示范(2016YFC0501900)	植被恢复、水源涵养等
	西藏退化高寒生态系统恢复与重建技术及示范(2016YFC0502000)	生物多样性保育、水源涵养等
	川西北和甘南退化高寒生态系统综合整治(2017YFC0504800)	生物多样性保育、水土保持等
	青藏高原退化草地恢复的主要物源制约因子及其应用技术研发(2019YFC0507700)	植被恢复、生物多样性保育等
黄河重点生态区	祁连山自然保护区生态环境评估、预警与监控关键技术研究(2019YFC0507400)	植被恢复、生物多样性保育、水土保持等
	黄土高原区域生态系统演变规律和维持机制研究(2016YFC0501600)	水土保持、生物多样性保育等
	黄土高原水土流失综合治理技术及示范(2016YFC0501700)	水土保持、水源涵养等
	黄土高原人工生态系统结构改善和功能提升技术(2017YFC0504600)	水土保持、水源涵养等
长江重点生态区	黄土丘陵沟壑区沟道及坡面治理工程的生态安全保障技术与示范(2017YFC0504700)	水土保持、水源涵养等
	珠江三角洲城市群生态安全保障技术(2016YFC0502800)	植被恢复、水源涵养等
	西南生态安全格局形成机制及演变机理(2016YFC0502100)	生物多样性保育、水源涵养等
	喀斯特峰丛洼地石漠化综合治理与生态服务功能提升技术研究示范(2016YFC0502400)	水土保持、植被恢复等
南方丘陵山地带	西南干旱河谷区生态综合治理及生态产业发展技术研发(2017YFC0505100)	水土保持、植被恢复等
	西南高山亚高山区工程创面退化生态系统恢复重建技术(2017YFC0504900)	植被恢复、碳固存等
	西南高山峡谷地区生物多样性保护与恢复技术(2017YFC0505200)	生物多样性保育等
	西南高山亚高山退化森林生态系统恢复重建技术研究(2017YFC0505000)	生物多样性保育、碳固存等
北方防沙带	闽三角城市群生态安全保障及海岸带生态修复技术(2016YFC0502900)	生物多样性保育、水源涵养等
	南方丘陵山地屏障带生态系统服务提升技术与示范(2017YFC0505600)	水土保持、水源涵养等
	南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理(2017YFC0505400)	水土保持等
	漓江流域喀斯特景观资源可持续利用关键技术研发与示范(2019YFC0507400)	植被恢复、水源涵养、生物多样性保育等
	荒漠化退化草地治理技术及示范(2016YFC0500500)	防风固沙、水土保持、植被恢复等
	内蒙古干旱荒漠区沙化土地治理与沙产业技术研发与示范(2016YFC0501000)	防风固沙、水土保持等
	中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治关键技术与示范(2016YFC0500900)	防风固沙、水土保持等
	新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术与集成示范(2016YFC0501400)	生物多样性保育、水土保持等
	北方草甸退化草地治理技术与示范(2016YFC0500600)	植被恢复等
	北方农牧交错带草地退化机理及生态修复技术集成示范(2016YFC0500700)	生物多样性保育、植被恢复等
	河套平原盐碱地生态治理关键技术与集成示范(2016YFC0501300)	水土保持、植被恢复等
	京津冀风沙源区沙化土地治理关键技术与示范(2016YFC0500800)	防风固沙等
	东部草原区大型煤电基地生态修复与综合整治技术及示范(2016YFC0501100)	植被恢复等
	京津冀城市群生态安全保障技术研究(2016YFC0503000)	水土保持、植被恢复等
	鄂尔多斯高原砒砂岩区生态综合治理技术(2017YFC0504500)	生物多样性保育、防风固沙等
沙区生态产业技术推广模式及政策研究(2017YFC0506700)	水土保持、防风固沙等	
东北森林带	西北荒漠—绿洲区稳定性维持与生态系统综合管理技术研发与示范(2017YFC0504300)	防风固沙、水土保持等
	西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术(2017YFC0504400)	防风固沙、植被恢复等
	基于低覆盖度理论的防沙治沙新材料、新装备、新技术研究(2018YFC0507100)	防风固沙等
	雄安新区生态基础设施及生态安全格局构建技术(2018YFC0506900)	防风固沙、生物多样性保育
	北方风沙区油沙豆防风固沙技术研究及示范(2019YFC0507600)	防风固沙等
	东北苏打盐碱地生态治理关键技术研发与集成示范(2016YFC0501200)	水源涵养、生物多样性保育、碳固存等
	东北黑土区侵蚀沟生态修复关键技术研发与集成示范(2017YFC0504200)	生物多样性保育、水源涵养等
全国	东北天然次生林抚育更新技术研发与示范(2017YFC0504100)	植被恢复、水源涵养等
	东北黑土区坡面水土流失综合治理技术(2018YFC0507000)	水土保持等
	生态技术评价方法、指标体系及全球生态治理技术评价(2016YFC0503700)	碳固存等
	城市化与区域生态耦合及调控机制(2017YFC0505700)	生物多样性保育等
	陆地生态系统碳源汇监测技术及指标体系(2017YFC0503900)	碳固存
“两屏三带”生态系统服务格局化(2018YFC0507300)	生物多样性保育、水源涵养等	
生物多样性保护目标和设计与评估技术(2018YFC050720)	生物多样性保育等	
“美丽中国”生态建设指标体系、评估方法及分区管理研究(2019YFC0507800)	水源涵养、水土保持、生物多样性保育、碳固存等	

此外,中国科学院战略性先导科技专项(A类)“创建生态草牧业科技体系”正处于执行期。该专项以中国科学院植物研究所牵头,聚集 60 余家科研单位,在权衡草地生产与生态功能的基础上,围绕我国生态草牧业展开了系统的集成性研究。随着上述项目的开展,基于各种草原类型区试验点的多年研究,退化草地演变规律和内在机理被不断阐释,新技术的研发和应用稳步推进,极大促进了我国退化草原的治理能力,为全面实现草地保护、修复以及生态系统功能提升提供了科技支撑^[47]。

5 未来草地生态系统保护和修复需要解决的关键科学问题

尽管党的十八大以来,生态文明建设从理论到实践都得到前所未有的发展,我国草地状况整体上趋于向好,但仍有大面积草地存在不同程度的退化,一些原生草地逐步丧失。未来在理论和技术方面,亟待回答的关键科学问题是:

(1) 制约不同类型和退化程度草地生态系统保护和修复的关键制约因子是什么? 在生态系统恢复过程中如何调控这些制约因子?

(2) 如何利用空一天一地的先进技术,在空间上对草地健康进行快速的诊断,对草地的恢复成效进行精准的监测?

(3) 如何通过优良乡土草种的筛选、品种培育、扩繁、组配,结合土壤养分及微生物调控,研发不同类型退化草地的“近自然恢复”技术体系,实现恢复草地的生物多样性、稳定性和持续性?

(4) 如何研发和集成各类退化草地的恢复技术,实现在景观尺度上、区域尺度上、流域尺度上的山水林田湖草系统化恢复和功能提升?

(5) 如何在区域尺度上开发生态恢复与富民措施相结合和的生态产品,实现由下到上可持续的生态恢复?

参 考 文 献

- [1] White RP, Murray S, Rohweder M. Pilot analysis of global ecosystems: grassland ecosystems. Washington: World Resources Institute, 2000.
- [2] Gibson DJ. Grasses and grassland ecology. New York: Oxford University Press, 2009.
- [3] 白永飞, 赵玉金, 王扬, 等. 中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 675—689.
- [4] Kemp DR, Han GD, Hou XY, et al. Innovative grassland management systems for environmental and livelihood benefits. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(21): 8369—8374.
- [5] 方精云, 白永飞, 李凌浩, 等. 我国草原牧区可持续发展的科学基础与实践. 科学通报, 2016, 61(2): 155—164, 133.
- [6] 周杰, 乔光华. 草原退化治理相关研究进展. 农业经济, 2020(7): 9—11
- [7] 国家林业局和草原局, 草原管理司. 我国草原生态修复用种的机遇与挑战. (2023-09-19)/[2023-11-04]. <https://www.forestry.gov.cn/c/cys/cybh/523354.jhtml>.
- [8] 贺金生, 刘志鹏, 姚拓, 等. 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术. 科技导报, 2020, 38(17): 66—80.
- [9] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [10] 苏大学. 1:1000000 中国草地资源图的编制与研究. 自然资源学报, 1996, 11(1): 75—83.
- [11] 同琳静, 刘洋洋, 章钊颖, 等. 定量评估气候变化与人类活动对西北地区草地变化的相对作用. 水土保持研究, 2020, 27(6): 202—210.
- [12] 白茹珍, 王呼和. 东北地区草地退化防治措施. 畜牧与饲料科学, 2008, 29(6): 102—105.
- [13] Qing ZS, Wu SH, Zhao DS, et al. Temporal-spatial changes in inner mongolian grassland degradation during past three decades. Agricultural Science and Technology, 2013, 14(4): 676—683.
- [14] Shang ZH, Ma YS, Long RJ, et al. Effect of fencing, artificial seeding and abandonment on vegetation composition and dynamics of ‘black soil land’ in the headwaters of the Yangtze and the Yellow Rivers of the Qinghai-Tibetan Plateau. Land Degradation & Development, 2008, 19(5): 554—563.
- [15] Gao QZ, Wan YF, Xu HM, et al. Alpine grassland degradation index and its response to recent climate variability in Northern Tibet, China. Quaternary International, 2010, 226(1/2): 143—150.
- [16] 宋淑珍, 熊康宁, 池永宽, 等. 中国南方喀斯特石漠化治理中的退化草地改良研究综述. 家畜生态学报, 2019, 40(3): 82—87, 96.
- [17] 贺金生, 卜海燕, 胡小文, 等. 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.
- [18] 乌兰夫. 乌兰夫文选. 北京: 中央文献出版社, 1999.
- [19] 朱教君, 郑晓. 关于三北防护林体系建设的思考与展望——基于 40 年建设综合评估结果. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1600—1610.

- [20] 赵金龙, 刘永杰, 唐芳林, 等. 中国草原自然公园建设的必要性. 中国草地学报, 2020, 42(4): 1—7.
- [21] 高鸿宾. 中国草原. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [22] 崔崑, 崔秀萍. 论退化草地与水土保持生态修复. 水土保持研究, 2005, 12(1): 101—104.
- [23] 国家林业和草原局. 祁连山国家公园青海片区保护成效显著. (2023-10-17)/[2023-11-14]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/lcdt/526916.jhtml>.
- [24] Jackson ST, Hobbs RJ. Ecological restoration in the light of ecological history. *Science*, 2009, 325(5940): 567—569.
- [25] Li YY, Dong SK, Wen L, et al. Soil carbon and nitrogen pools and their relationship to plant and soil dynamics of degraded and artificially restored grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Geoderma*, 2014, 213: 178—184.
- [26] Tilman D, Downing JA. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, 367: 363—365.
- [27] Ives AR, Carpenter SR. Stability and diversity of ecosystems. *Science*, 2007, 317(5834): 58—62.
- [28] Hautier Y, Seabloom EW, Borer ET, et al. Eutrophication weakens stabilizing effects of diversity in natural grasslands. *Nature*, 2014, 508: 521—525.
- [29] 毛培胜, 侯龙鱼, 王明亚. 中国北方牧草种子生产的限制因素和关键技术. 科学通报, 2016, 61(2): 250—260.
- [30] Vander Mijnsbrugge K, Bischoff A, Smith B. A question of origin: where and how to collect seed for ecological restoration. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11(4): 300—311.
- [31] De Vitis M, Abbandonato H, Dixon K, et al. The European native seed industry: characterization and perspectives in grassland restoration. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1682.
- [32] Socher SA, Prati D, Boch S, et al. Direct and productivity-mediated indirect effects of fertilization, mowing and grazing on grassland species richness. *Journal of Ecology*, 2012, 100(6): 1391—1399.
- [33] You QG, Xue X, Peng F, et al. Comparison of ecosystem characteristics between degraded and intact alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 133—143.
- [34] Shang ZH, Long RJ. Formation causes and recovery of the “Black Soil Type” degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers of Agriculture in China*, 2007, 1(2): 197—202.
- [35] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: a review and perspectives. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1): 1—39.
- [36] Elser JJ, Fagan WF, Denno RF, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408: 578—580.
- [37] Güsewell S, Verhoeven JTA. Litter N: P ratios indicate whether N or P limits the decomposability of graminoid leaf litter. *Plant and Soil*, 2006, 287(1): 131—143.
- [38] Zak DR, Holmes WE, White DC, et al. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: are there any links? *Ecology*, 2003, 84(8): 2042—2050.
- [39] Kardol P, Wardle DA. How understanding aboveground-belowground linkages can assist restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(11): 670—679.
- [40] Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629—1633.
- [41] Backer R, Rokem JS, Ilangumaran G, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1473.
- [42] Prieto I, Roldán A, Huygens D, et al. Species-specific roles of ectomycorrhizal fungi in facilitating interplant transfer of hydraulically redistributed water between *Pinus halepensis* saplings and seedlings. *Plant and Soil*, 2016, 406(1): 15—27.
- [43] Coban O, De Deyn GB, van der Ploeg M. Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded lands. *Science*, 2022, 375(6584): eabe0725.
- [44] Jasper Wubs ER, van der Putten WH, Bosch M, et al. Soil inoculation steers restoration of terrestrial ecosystems. *Nature Plants*, 2016, 2(8): 16107.
- [45] Harris J. Soil microbial communities and restoration ecology: facilitators or followers? *Science*, 2009, 325(5940): 573—574.
- [46] 蒋胜竟, 冯天骄, 刘国华, 等. 草地生态修复技术应用的文献计量分析. 草业科学, 2020, 37(4): 685—702.
- [47] 白春礼. 科技支撑我国生态文明建设的探索、实践与思考. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 125—131.

Key Scientific Questions of Grassland Protection, Restoration and Function Improvement

Jianxiao Zhu¹ Zhanhuan Shang² Shengjing Jiang¹ Yan Shi¹ Qisheng Feng¹
Xinquan Zhao³ Xiaoping Xin⁴ Yuchun Yan⁴ Yanjun Su⁵ Jin-Sheng He^{1*}

1. *State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020*
2. *State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000*
3. *State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016*
4. *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081*
5. *Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093*

Abstract Grassland accounts for 27.6% of China's land area and plays an important role in maintaining ecological security of China. This paper summarized the development of China from a single pursuit of material production function of grassland resources, to the production and ecological balance, and to the current ecological priority and multi-functional goal management, analyzed the changes in the emphasis of the current status of grassland protection and restoration policy in China, and its role in curbing grassland degradation, and analyzed the constraints such as the germplasm resource of native grasses, soil nutrients and soil microorganisms during the process of China's grassland restoration, and then introduced the concept of close-to-nature restoration of grassland by relying on the natural processes to restore the degraded grassland to an ecosystem whose biodiversity and stability is close to that of the regional community; and the key scientific issues that need to be addressed in future protection and restoration of grasslands in China were condensed. It is suggested that under the guarantee of grassland protection and restoration policy in the new era, respecting and complying with nature, and practicing the concept of close-to-nature restoration will lead the grassland protection and restoration from vegetation to ecosystem in the future.

Keywords key ecological protection and restoration projects; degraded grasslands; native grass; soil nutrients; soil microorganisms; close-to-nature restoration

(责任编辑 刘敏 张强)

* Corresponding Author, Email: jshe@lzu.edu.cn