

DOI: 10.5846/stxb201908301803

张 骞, 马 丽, 张 中 华, 徐 文 华, 周 秉 荣, 宋 明 华, 乔 安 海, 王 芳, 余 延 娣, 杨 晓 渊, 郭 婧, 周 华 坤. 青 藏 高 寒 区 退 化 草 地 生 态 恢 复: 退 化 现 状、恢 复 措 施、效 应 与 展 望. 生 态 学 报, 2019, 39(20): - .

Zhang Q, Ma L, Zhang Z H, Xu W H, Zhou B R, Song M H, Qiao A H, Wang F, She Y D, Yang X Y, Zhou H K. Ecological Restoration of Degraded Grassland in Qinghai-Tibet Alpine Region: Degradation Status, Restoration Measures, Effects and Prospects. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

青 藏 高 寒 区 退 化 草 地 生 态 恢 复: 退 化 现 状、恢 复 措 施、效 应 与 展 望

张 骞¹, 马 丽¹, 张 中 华¹, 徐 文 华¹, 周 秉 荣², 宋 明 华³, 乔 安 海⁴, 王 芳¹, 余 延 娣¹, 杨 晓 渊¹, 郭 婧¹, 周 华 坤^{1,*}

1 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810001

2 青海省气象科学研究所, 西宁 810001

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

4 青海省草原总站, 西宁 810001

摘要: 青藏高寒区属于独特而典型的高原生态系统, 草地生态系统作为其重要组成部分, 在对高寒区生态安全以及农牧民生计的维系中, 占有举足轻重的地位。目前, 青藏高寒区的草地生态系统退化严重, 因此该区退化草地的生态恢复工作是国家生态工作的重中之重。近年来, 已有大量研究提出了各种有效的恢复手段, 但缺乏因地制宜的系统性总结和论述。基于此, 在现有相关文献资料的基础上, 阐述了青藏高寒区退化草地现状, 总结了高寒区各生态类型分区的主要生态问题, 明确了不同集成技术与模式的适用区域和范围, 同时对这些技术、措施和模式的恢复效果和恢复机制进行分析和讨论。并对未来高寒草地生态系统的研究进行了展望, 以期对青藏高寒区退化草地的恢复治理、高寒草地生态系统结构和功能稳定性维系提供系统的理论基础与技术支撑。

关键词: 退化草地; 生态恢复; 综合治理; 适应性恢复; 恢复效应

Ecological Restoration of Degraded Grassland in Qinghai-Tibet Alpine Region: Degradation Status, Restoration Measures, Effects and Prospects

ZHANG Qian¹, MA Li¹, ZHANG Zhonghua¹, XU Wenhua¹, ZHOU Bingrong², SONG Minhua³, QIAO Anhai⁴, WANG Fang¹, SHE Yandi¹, YANG Xiaoyuan¹, ZHOU Huakun^{1,*}

1 Key Laboratory of Restoration Ecology for Cold Regions Laboratory in Qinghai, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810001, China

2 Institute of Meteorological Science of Qinghai Province, Xining 810001, China

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 Qinghai Provincial Grassland Station, Xining, Qinghai 810001, China

Abstract: The Qinghai-Tibet alpine region is a typical plateau ecosystem with unique features. As an important part of the grassland ecosystem, it plays an important role in the ecological security of the alpine region and the livelihood of farmers and herdsmen. At present, the grassland ecosystem in the Qinghai-Tibet alpine region is seriously degraded. Therefore, ecological restoration of degraded grasslands is the main priority in this area. In recent years, a large number of studies

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划(STS 计划 KFJ-STZ-ZDTP-036); 国家重点研发计划课题(2016YFC0501901); 青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20); 青海省自然科学基金面上项目(2019-ZJ-908)

收稿日期: 2019-08-30; 修订日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hkzhou@nwipb.cas.cn

proposed various effective recovery methods, but there is no systematic summary and discussion of local conditions. Based on these findings as well as on the relevant literature, this paper explains the status of degraded grasslands in the alpine region of Qinghai-Tibet in detail, summarizes the main ecological problems of various ecological types in this region, and clarifies the scope of application of different integration technologies and models. We analyzed and discussed the recovery mechanisms of these technologies, measures, and models. Future research of the alpine grassland ecosystem is necessary in order to provide a systematic theoretical basis and technical support for the restoration and control of degraded grasslands in alpine and cold regions of Qinghai and Tibet, as well as to ensure the structural and functional stability of the alpine grassland ecosystem.

Key Words: degraded grassland; ecological restoration; comprehensive treatment; adaptive recovery; recovery effect

青藏高原是全球最大的高寒草地分布区,也是高寒生物资源的重要基因库^[1]。高寒草地作为青藏高原主要的植被类型,对青藏高原的气候调节、水源涵养、土壤形成与保护等生态系统服务的维持有着重要影响,在保障区域生态安全格局和响应全球气候变化等方面发挥着重要的作用^[2]。近年来,随着气候变化和人类活动对青藏高原影响的与日俱增,高寒草地的退化日趋严重,土地生产力也逐渐减低,对高寒草地生态系统服务功能的正常发挥造成严重威胁^[3]。此外,高寒草地的退化也威胁着高寒地区的生物多样性^[4-5],因此,当前的退化高寒草地恢复问题给国家以及科学界带来了巨大的挑战,引起了广泛的关注^[6-7]。

针对目前现状,虽然已有大量的研究对高寒草地的退化恢复进行了探讨,并提出了一系列的恢复措施及技术^[8-10],但在研究其退化现状和恢复措施机制等方面目前稍显薄弱。为此,本文依据高寒草地亚类的功能分区模型以及退化演替的分区特征^[11-12],将青藏高原的草地分为 5 个典型脆弱生态区(表 1,图 1),即三江源区、环青海湖及祁连山区、一江两河地区、藏北和那曲地区、川西和甘南地区。通过对以往研究文献的综合整理,明确各脆弱生态区的草地退化现状以及主要生态问题,探讨现有恢复措施的优劣及效应,以期对已有的生态恢复技术和模式进行优化、融合和集成,并对其中存在的问题进一步加以探讨和总结。

表 1 青藏高原草地类型的区域分布及主要特征

Table 1 The regional distribution and main characteristics of grassland types on Qinghai-Tibet plateau

区域 Regions	典型脆弱生态区 Typical weak ecologies	海拔 Elevation/m	草地面积 Grassland area/hm ²	草地类型 Grassland types	植被特性 Vegetation characteristics
青藏高原东部	三江源区	3500—4500	4991.8	高寒草甸	优势种为嵩草草甸,丰富度高,覆盖度高,产量低
祁连山脉及环青海湖区域	环青海湖及祁连山区	2000—3500	943.5	温带草地、高寒草地和高寒草甸	丰富度高,覆盖度高,产量高
西藏西南部	一江两河地区	4000—6000	1912.6	温带山湖盆地和高寒草地	植物密度富,草场质量低
西藏西北部	藏北和那曲地区	4500—5300	4849.8	高寒草地和沙漠	物种多样性、植物密度和牧草产量低
喜马拉雅山脉南部山谷	川西和甘南地区	1500—4500	338.5	暖灌木草甸和山脉草甸	丰富度高,覆盖度居中,产量低

1 草地退化的表征及各典型脆弱生态区的恢复现状

1.1 高寒草地退化的表征

草地退化主要表现在 2 个层面:一是植被退化,表现为植被的高度、覆盖率、产量和质量下降;二是土壤生境退化,表现为土壤性质及微生物特性的发展方向不利于植被的生长。本质上,草地的退化是植被-土壤系统的协同退化^[13-15]。

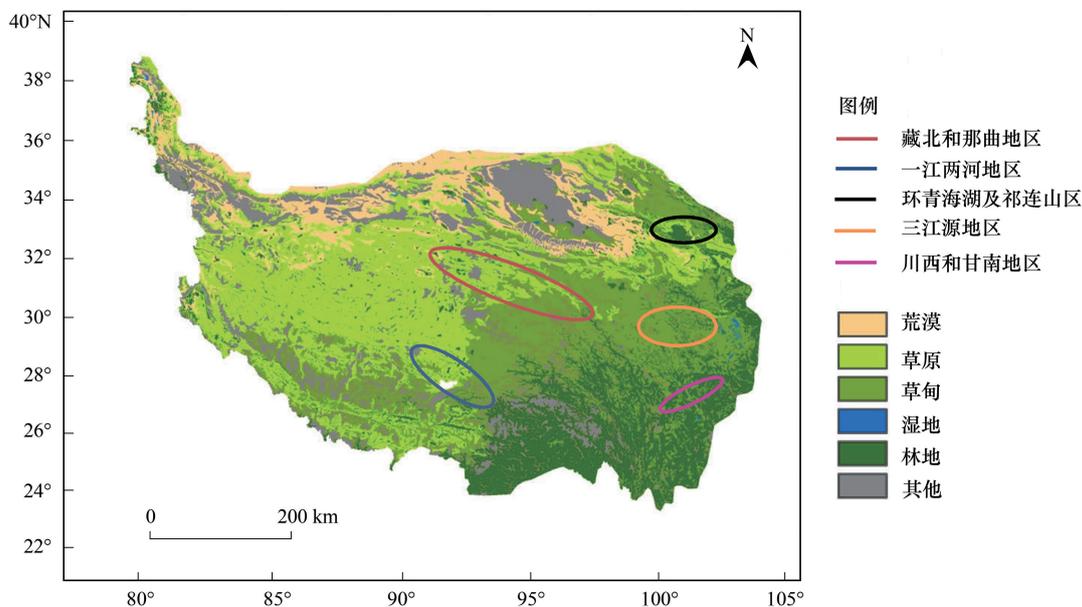


图 1 典型脆弱生态区分布图

Fig.1 Typical fragile ecological zone distribution map

从植被退化角度来看,曹广民^[16]等认为高寒草地的植被退化大多都是由禾草—矮蒿草群落演替为蒿草群落,然后由蒿草群落转化杂类草,最后演变为黑土型次生裸地。赵贯锋等^[6]认为随着高寒蒿草草甸退化,由莎草科和禾本科为主的植物演替为杂类草地。肖玉^[17]认为高寒草原退化过程中,群落优势种从青藏苔草演变为青藏苔草和高山蒿草并存,最后转为珠芽蓼和沙生风毛菊的杂类草地。周华坤^[18]等认为随着高寒草原退化程度加大,植被盖度、草地产量和质量以及草地上生物多样性逐渐下降。赵玉红^[19]等认为随着草地退化程度的加剧,群落水平的总生物量以及叶和茎的生物量明显减少。刘育红^[20]等认为高寒草甸群落中,植物优势度在草地退化演替格局中发生变化,莎草科、禾本科植物优势度总体随草地退化程度的加剧而降低,杂类草、豆科植物优势度总体随退化程度的加剧而逐渐增加。综上可知,植被退化的表征为优势种发生了明显的接替变化,植被的生产力、多样性、高度、覆盖率和质量等也随着草地退化程度的加剧而明显下降。因此,本文认为退化草地的植被变化会表现在植物群落的结构功能、生物生产以及质量等各个方面,所以可以结合植被各个方面的变化,通过建立合理的系统结构、内容构成、异质性等实现退化草地恢复的目标。

从土壤生境退化角度来看,魏卫东^[21]等认为植被或植物群落发生变化的时候,必然会导致其生存环境中的土壤条件发生改变,草地退化情况以及与土壤因子的关系极其复杂。杨元武^[22]等认为不同退化梯度上土壤化学性质均发生变化,其中速效养分随退化程度的加剧明显减少。于宝政^[23]等认为在高原冷湿环境中退化草地表层、亚表层土壤团聚体的下降幅度随草地退化加剧均趋于显著提高。李建宏^[24]等认为随着退化程度的加剧,土壤中的固氮菌呈减少趋势。此外,草地退化导致高寒草地固氮性植物减少,从而降低土壤中有机氮含量,减少草地氮库^[25]。易湘生等^[26]认为土壤持水量总体上随草地植被退化而减少。在王学霞^[27]等认为草地退化显著降低了高寒草甸和草原土壤净硝化速率和净氨化速率。温军^[28]等认为随着高寒草原退化程度的增加,生长季土壤的呼吸速率先增加后降低,在中度退化程度下达到最高,而在重度退化程度下降至最低。综上,退化的草地土壤贫瘠,微生物群落减少,水分条件差,植物生长必要营养元素缺乏,植物-土壤协同作用减弱,从而导致土地退化加剧程度,陷入退化的恶性循环。

因此,在退化草地恢复治理过程中,要关注对草地生产能力的恢复和提高。特别是草地的生物组分(植物、动物或微生物)和土壤的结构与功能。重点改善生物多样性,水平与垂直结构,物质循环与能量流动等功能,使恶化的草地发生的良性改变和发展。

1.2 青藏高寒区各典型脆弱生态区草地的恢复现状

三江源区位于青藏高原的腹地青海省南部,是长江、黄河和澜沧江的源头区,总面积为 $3.63 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占青海省总面积的 50.4%,全区平均海拔在 3700—4200 m 之间^[29],全区的天然草地面积 $2141.75 \times 10 \text{ hm}^2$,可利用草地面积占全区草地面积的 89%,为 $1926.6 \times 10 \text{ hm}^2$,该区分布着以嵩草(*Kobresia*)植物为主的高寒草甸和以针茅属(*Stipa*),羊茅属(*Festuca*)植物为主的高寒草原^[30]。上世纪 70 年代起,三江源区存在的主要生态问题表现有:林草植被盖度降低,湿地生态系统面积减少,湖泊萎缩,冰川后退,水资源减少^[31-32];草地退化与土地沙化日趋加剧,水源涵养功能下降,江河径流量逐年减少,水土保持功能减弱^[33-34];草原鼠害猖獗^[35];生物多样性减少^[36];生态难民逐年增加^[37]。此外,“黑土滩”是三江源区草地退化最为严重的次生裸地,其形成和发展严重制约了整个高寒草地区域的植被群落结构和植被生产力^[7,38]。高寒草地(包括高寒草原、高寒草甸、高寒荒漠草原和高寒湿地草甸)在气候变化、鼠虫害、过度放牧等自然和人为因素的共同作用下呈现出明显的退化趋势,草地退化加速。基于上述生态问题,生态学家提出了一系列的恢复措施及技术,如退牧还草、退耕还林(草)及封山育林:对大面积退化草原进行退牧还草,对轻度退化草地和为退化草地采取禁牧和围栏封育^[39]。种树和牧草适宜相结合,根据气候条件,选择适生树种和优良牧草间种,提高水土涵养蓄水能力^[40]。人工种草,根据当地气候条件选择以多年生禾本科牧草为主,如早熟禾、老芒麦等较耐寒的草种,进行人工混播,达到退化草地生态恢复重建效果^[41-42]。建立饲草料基地,缓解饲料不足问题,促进草场生态系统可持续利用。

上述措施的实施使得三江源区的草地退化得到了一定的恢复。赵健赞^[43]等利用 2001 年、2010 年和 2015 年的 Landsat 数据的分析表明三江源区泽库县在 2001—2015 年之间,植被覆盖状况有显著改善,并向高植被覆盖方向变化。冯亚杰^[44]等通过提取三江源区玛沁县不同时期的植被覆盖度动态变化总体特征,认为 2005—2015 年来植被覆盖度呈下降趋势,植被覆盖度的面积减少近 4000 hm^2 ,覆盖度减少区面积占比为 20.96%,比重较大,植被覆盖不稳定并呈现退化趋势。但有研究表明近 15 年(2001—2015)三江源区草地生态呈明显好转态势,草地退化面积仅占三江源区总面积的 5.85%。2004—2012 年三江源生态工程实施以后,该地区草地退化趋势基本得到控制,而且呈现出不同程度的减缓趋势,仅有极少数县发生退化和退化加剧现象^[45]。徐新良^[46]等的遥感解译结果显示,到 2012 年为止,三江源退化草地面积比 2004 年降低了 5.78%,其中中度退化草地的面积减少最显著,下降了 5.35%。研究表明长江源和黄河源草地退化情况比较严重,玛多县、曲麻莱县、称多县北部和治多县东南部草地退化最为明显。而且通过对三江源地区草地退化态势的遥感解释,2004—2012 年草地退化的态势发生减缓,局部地区草地状况得到明显好转(图 2)^[46]。

从三江源地区各流域草地退化面积统计图(图 2)可以看出,2004—2012 年黄河、长江和澜沧江三大流域退化草地在逐渐好转,也由此可见,长江流域发生退化最为严重。由中国测绘科学研究院牵头完成的“三江源国家生态保护综合试验区草地监测”研究成果显示^[47]:2004—2013 年期间,整个青海三江源国家生态保护综合试验区的草地生态系统有所好转,草地退化趋势已经基本得到遏制,呈轻度恢复趋势。退化草地总面积的 54% 状况稳定,30% 逐渐恢复,16% 持续退化。由此可见,各项草地生态保护政策使得三江源区生态恢复进程加快,草地长势趋好,植被盖度稳步增长,三江源的退化态势得到了明显好转。

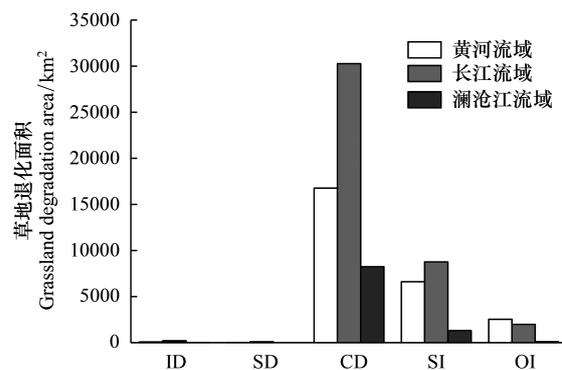


图 2 2004—2012 年三江源区草地退化面积统计图

Fig. 2 Grassland degradation area in the “Three-River Headwaters” region during 2004—2012

ID 表示退化加剧;SD 表示轻微退化;CD 表示退化程度不变;SI 表示轻微好转;OI 表示明显好转

环青海湖及祁连山区属于生态脆弱带, 植被结构简单且生长周期短, 自我恢复能力差。青海湖区域的退化草地主要分布在湖周围, 重度退化草地主要为湖东沙地、鸟岛以及耕地和居民区, 中轻度草地退化面积为东岸和北岸^[48-51]。祁连山是我国六大天然牧场之一, 其高寒草地是内陆河的重要水源涵养区, 总面积为 $4.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 据统计, 区域内退化草地的面积约为 $3.32 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占比高达 76.7%。草地退化变现为覆盖率降低, 植被稳定性差且牧草的质量和产量均发生了明显的下降, 土壤生产力下降以及深层土壤旱化等^[52-53]。目前存在的主要生态问题可总结为有: 环青海湖流域森林植被趋于消退状态; 高寒植被类型相对稀少; 湿生生态系统趋于退化; 环湖流域高寒草甸草场、高寒灌丛草场、山地草原草场、沼泽草场、疏林草场面积均有缩减, 荒漠面积不断扩充, 有向荒漠化发展趋势; 环湖流域优良牧草种类减少, 毒杂草大量滋生, 可食草量大幅度下降, 植被盖度降低; 环湖气候干暖化、放牧草地长期超载过牧、盲目垦荒、乱采滥伐、鼠虫危害等; 祁连山区域土壤利用率下降, 草地生态系统稳定性丧失严重^[54-55]。

有研究表明^[56], 2000—2013 年间, 青海湖流域未退化草地面积为 $8.89 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占流域面积的 29.97%。处于退化状态但没有发生变化的草地为 $1.20 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占流域面积的 40.42%, 明显恢复的草地面积为 $3.26 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占 1.10%。骆成凤^[49]等研究表明在 2010 年青海湖的未退化草地在整个流域占 38%。2000 年以来, 青海湖流域草地变化幅度非常小, 呈轻微恢复趋势。2014 年至今, 祁连县依托祁连山退牧还草等工程项目的实施, 累计治理黑土滩 $1.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。通过治理, 黑土滩草地植被盖度从 10% 提高到 80% 以上, 牧草平均高度达到 50cm 以上^[57-58]。《祁连山生态变化评估报告》显示, 截止到 2017 年, 祁连山植被 NDVI 指数和覆盖度反映出 2000—2017 年祁连山植被状况为“整体向好、局部恶化”的态势, 祁连山区约 33.6% 的面积植被 NDVI 指数显著增加, 禁牧后草地的土壤有机质、覆盖度逐步增加^[59]。

西藏一江两河地区, 通过生态环境脆弱性驱动力分析可以看出, 1990 年该地区自然因素驱动占主要地位, 到 2004 年人为因素的影响不断加大, 尤其是人口快速增长, 过度放牧, 过度樵采等不合理人类活动加剧了区域生态脆弱性^[60]。该区存在的主要生态问题有: 土壤以钙积层为主, 地势低洼排水不畅的地方有草甸土和沼泽土, 受其天然环境的影响, 植物生产量低, 土壤中的有机质分解慢, 腐殖化作用弱^[61]。一江两河地区退化草地多集中在河谷地区, 该区草场退化的主要表现为草优质牧草减少, 毒草丛生, 鼠害现象严重, 土壤沙化^[62,63]。一江两河地区的草地退化以沙漠化问题最为突出, 地区沙漠化土地总面积为 $1.86 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[64]。为防御沙漠化, 一江两河地区草地面积近 10 年来迅速增加, 增加了区域内植被覆盖度。在一定程度上, 使得高寒草地免于沙化威胁, 逐渐得到恢复^[65]。

藏北和那曲地区位于我国青藏高原腹地, 西藏自治区的北部, 全区的总面积为 $4.20 \times 10^4 \text{ km}^2$, 草地的面积占 86%^[66]。存在的主要生态问题有: 由于气候环境严酷, 生态环境极为脆弱, 加之人为因素使那曲地区天然草地退化、沙化现象, 近年来趋于严重。基于此, 戴睿等^[67]分析了那曲草地退化的时空变化特征, 发现 2002—2010 年期间, 那曲地区草地轻度退化, 其中 2002—2005 年之间是草地退化的主要阶段。王金枝等^[68]以植被覆盖度为评价指标分析了 1990—2015 年间那曲高寒草地退化和恢复程度, 认为 1990—2015 年间那曲高寒草地退化状况总体好转, 该地区退化草地面积占总面积 35.83%, 恢复面积占 64.17%。藏北那曲高寒草地退化的影响因素有超载放牧、鼠虫害、滥挖药材、道路工程建设、矿产资源开发, 其中超载放牧和鼠虫害是导致该地区草地退化的主导因素, 这可为藏北那曲地区的草地恢复提供了基础依据。

川西和甘南地区, 位于喜马拉雅山脉南部山谷, 草地类型为山脉草甸。存在的主要生态问题是: 在草地退化过程中, 由于杂类草和毒害植物的侵入, 造成了天然草地退化, 导致地表裸露。加上当地气候条件的影响, 土壤退化严重, 土壤中的养分和有机质含量持续下降, 土质恶化。近几年, 随着生态环境的恶化, 草地退化态势加重, 植被的产量和质量持续下降, 有毒有害牧草比重增加^[69]。目前全区 80% 的草地都发生了退化现象。由于人类的过度放牧引起草地植被严重退化, 导致草地生态失衡, 发生严重的鼠害现象。甘南州的草地覆盖率从 85% 以上逐渐降低为不足 45%, 许多植物物种也濒临灭绝^[70]。综上, 甘南州草地退化的现状主要有草地的生产能力下降; 植被覆盖率降低, 毒草发展为优势种; 草地鼠虫害日益加剧, 面积减少; 沼泽化草甸的面积萎

缩,部分地区出现黑土滩。

在退化草地恢复方面,马玉秀^[71]等研究表明川西高原在 2000—2008 年期间,草地总体上处于恢复状态,草地发生退化的面积仅占 8%左右,且显著退化与极显著退化面积仅仅占 0.10%,退化区域相对集中。2017 年在色达县的川西高原生态脆弱区综合治理项目打造了川西高原生态脆弱区综合治理示范样板,将辐射带动周边典型高原县生态治理。类似措施的实施,将在今后的恢复工作中发挥重要的作用。

2 退化草地生态恢复的措施与效应

退化草地生态恢复的目标集中于两种功能,即生态功能和生产功能,恢复目标的类别主要以生物多样性(biodiversity)、植被覆盖度和密度(Vegetation coverage and density)、土壤碳库(Soil carbon pool)为主,其余的恢复目标包括生产力(Productivity)、昆虫群落(Insect community)、植物群落结构(Plant community structure)、草地载畜量(Grassland carrying capacity)、目标物种(Target species)等。但在不同的案例研究中又根据实际情况的的不同进行较详细的区分^[72]。在实际案例中,一般都是多个目标的恢复,很少有单一的恢复目标。在很多的研究过程中,恢复目标的选择和确定主要受到研究对象的生物学特点以及研究人员的专业领域的影响。但其中植被覆盖率是稳定不变的恢复目标,几乎在所有相关领域的研究案例中都有涉及^[73]。

2.1 退化草地生态恢复的措施和机制

在三江源区,退化草地生态恢复的研究主要集中于高寒草地分类及其相应的退化成因、生态恢复技术以及生态农牧业发展模式,并在这些方面取得了一系列研究成果和理论技术^[74]。根据该区的主要生态问题,研发了高寒草地“分区-分类-分级-分段”的恢复治理技术和管理模式,如人工种草、人工改良、半人工草地建设、人工草地复壮技术、人工草地分类建植技术、刈用型人工草地建植技术、放牧型人工草地建植技术、高寒地区燕麦和箭筈豌豆混播技术、黑土坡治理技术等。基于分区,研究轻、中度退化草甸近自然恢复技术,用人工干预引导黑土滩、群落分类和生态恢复技术体系构建,开展区域性示范。基于分类,应用相关技术制定不同程度的退化草地分类标准^[75],基于分级,依据植被的覆盖度、生物量以及土壤有机质等指标,以天然草地为对照,将退化草地划分为轻度、中度、重度及极度 4 个等级,对高寒草地的退化等级进行划分,针对不同的等级,对退化草地的恢复进行分类治理^[76]。

在环青海湖及祁连山区,针对其主要的生态问题,主要治理措施集中在退耕还草、轮牧、灌草结合、围栏封育^[77]。其中,围栏封育是我国退化草地最常用的恢复措施,其措施是把目标草地围起来,封闭一段时间,在此期间限制对草地进行任何开发利用,给牧草提供休养生息的机会,让草地进行自然恢复,能够自身积累足够的营养物质,逐渐恢复草地的生产力,促进草地的自然更新。围栏封育可以有效控制土壤营养成分的流失,改善草场土壤生态系统,有利于草地恢复,推进草地生态系统的管理和建设^[78]。王启基等^[79]在三江源区根据天然草地退化程度的差异,采用不同的调控措施,使得植被物种构成、地上生物量等特征值及其植被盖度发生明显变化,总结认为在退化较严重的草地采用补播+施肥,轻度退化天然草地采用封育+施肥措施。

在西藏一江两河地区,针对其主要的生态问题,主要治理分为两类,一是退化草地综合治理技术集成。即山地轻度退化草地采用减轻牧压自然恢复为主,河谷轻度退化草地采用围栏封育和冬季放牧等方式进行自然恢复;中度退化草地采用划破草皮和免耕补播两种技术;重度退化建植人工草地,分多年生和一年生两种类型或者混合配置,有灌溉条件的种植一年生饲草,无灌溉条件的雨季种植多年生混播牧草。二是草地畜牧业高效发展技术集成。即季节性轮牧主要是夏季在山地草地放牧,冬季休牧;河谷不同放牧草场之间进行短期轮牧;针对绵羊养殖,开发了半放牧半舍饲和夏放牧冬舍饲技术。

在藏北和那曲地区,针对其主要的生态问题,主要治理的治理措施有围栏封育、补播、施肥、人工草地建植、灌溉等^[80-82]。其中施肥效果最佳,王伟^[80]等在研究了不同氮肥及施氮水平对高寒草地生物量以及土壤养分的影响,研究表明施硫酸铵后该区高寒草甸明显增产,其次是尿素,硝酸钙效果最差,施肥量的最佳标准为 200 kg/hm²。有研究表明,氮的沉积通过改变生物物种组成来增加草地的地上生物量^[83]。氮肥可以通过不

同的机制大幅度改变生态系统的稳定性,高氮输入会降低高寒草甸的稳定性,对高寒草地植被群落的稳定性会产生长期影响^[84]。

在川西和甘南地区,针对其主要的生态问题,主要治理的治理措施主要有乔灌草恢复模式、防沙固沙恢复模式、围栏封育、人工草地建植等。有研究表明^[71]补播措施使得当年退化草地物种丰富度增加,明显提高了植被的覆盖率和地上生物量,且禾草类为优势种。同时,在川西北地区,近 10 年期间来该地区因地制宜对退化草地实施了生物网格治沙技术,机械网格治沙技术,沙化草地物种补播的草种选择技术等防沙固沙技术模式。取得了显著的成果。

综合来看,以上这些是采取的一些人工技术措施来提高草地的生产力,实现退化草地恢复的目标。围栏封育的恢复措施耗时长;草地补播和施肥等措施会对草地和土壤生态系统产生较大的干扰性;植被更新中不同草地退化等级、退化阶段以及土壤性质等因素都会对植被的选择提出要求,工作量大,耗时长。基于草地退化等级的差异,可以采用分级的模式利用以上技术进行草地恢复。对于轻度退化草地,可以采用围栏封育的方式进行生态恢复,去除外界环境干扰,让其自然恢复;对于中度退化草地,可以采用人工补播施肥,清除毒草以及灭除鼠害等方式来治理;对于恢复困难大的极重度退化土地,比如“黑土滩”,采用人工改建成人工草地,利用植被更新等措施治理。草地恢复治理后的管理和合理利用非常重要,武高林等^[85]研究表明建立高效集约化的畜牧业生产模式对青藏高原高寒区草地畜牧业生产有重要的积极作用。

围绕青藏高原生态系统的恢复与发展所开展的一系列恢复措施,内在都有着密切的相关性,对草地生态恢复技术及其集成模式具有启示作用。针对高寒草地退化等级的不同,研发出适宜的综合治理模式。同时,这些措施已经在三江源取得显著的效果和收益,为三江源退化草地的恢复与综合治理提供了技术支撑^[76]。在高寒草地生态监测技术研发方面,主要有遥感监测和样地评估技术、土地养分遥感评价与监测技术、高寒天然草地分类与动态监测支撑信息系统以及人工草地建植与管理信息系统^[86-87]。

2.2 退化草地生态恢复的效应

通过对各生态脆弱区因地制宜的实施恢复措施、技术、模式,退化草地恢复取得了显著的效果。最早实施的围栏封育措施,取得了很好的恢复效果,但也存在不足之处。有研究表明经过短期围栏封育,不同草地类型群落特征均有明显变化,主要表现为草层高度增加、植被总覆盖度提升、地上生物量增加、优良牧草(禾本科、莎草科)的比例增加,但围栏封育多年后又会下降^[88]。休牧利用能够保持山地草甸草原的可持续利用,可使草原表现正向性演替^[89-90]。面对天然草地退化的压力,及人民生活质量持续稳定提高对畜牧业的需求;建立高效人工草地模式是畜牧业资源高效利用的必然选择,也是推动我国畜牧业持续、稳定、高效发展的必然选择^[91]。在青藏高原“黑土型”退化草地上建植多年生草地,不仅能使土壤资源有效性和微生物菌群得以恢复,同时也能促进土壤-植物间的相互调节作用,有利于人工草地群落稳定性的提高^[92]。

此外发现,放牧对于退化草地的恢复具有两面性。过度放牧会降低植物种的多样性^[93],但适度的放牧会对气温升高导致的高寒草地生物多样性降低发挥重要的缓冲作用。而且适度放牧可降低草场群落中优势种的竞争作用,给其他植物的发展创造了潜在机会,促进草地植物群落多样性的维系和发展^[94]。就恢复草地生产力来讲,有研究表明^[95]三种措施都能提高土地生产力、地上生物量以及生物多样性。围栏封育、施肥改良,划破草皮使可食牧草的产量分别增加了 60.5%—158.3%、45.9%—191.1%、32.7%—113.9%。实施禁牧+施肥+防除的退化草地恢复措施后,地上生物量显著大于禁牧的优良牧草的地上生物量,且秋季刈割措施能显著降低狼毒的密度,增加其他牧草产量^[96]。

在退化高寒草地施用氮肥也是一种有效的恢复措施。氮素输入可以显著提高根茎禾草、丛生禾草、豆科植物、苔草类植物的粗蛋白和粗脂肪含量,增加牧草品质^[97],但是会降低其物种多样性,改变植被群落的生存环境,从而会改变植被特征^[98]。对物种多样性来讲,灌溉措施有利于提高群落生物多样性和稳定性,促进退化草地的恢复^[99]。青藏高寒区所实施的一种生态畜牧业发展模式,既有利于保护青藏高原高寒草地生态系统,又有利于促进畜牧业的可持续发展,实现高寒区传统畜牧业的转型发展。这种新型畜牧业发展模式的建

立为草场提供了休养生息的机会,为退化草场恢复提供了保障,同时可以促进草地畜牧业经济的发展。

3 展望

(1)高寒草地退化演替过程与自身脆弱的生态环境、气候变化以及人类活动息息相关,在高寒草地生态系统变化、退化防控与恢复治理方面,对高寒草地退化的驱动因素进行量化分析以及高寒草地退化程度的量化、可视化表征,为其综合治理及治理体系评价提供了技术和理论支撑。但气候变化和人类活动等因素对高寒草地生态系统的影响机制以及定量模拟、精准化方面仍需进行更加系统地研究,以达到准确揭示不同区域、不同草地类型高寒草地退化演替的生态过程和机制,对草地退化的驱动因素实现精准控制,并且为高寒区退化草地的恢复提供理论基础和技术支撑。

(2)在退化高寒草地生态恢复的综合研究过程中,在青藏高寒区主要以“黑土滩”退化草地的为恢复研究对象,研究主要集中于对高寒草地恢复技术和机制的研究,所以还应该对各类退化草地的恢复技术及其产生的效应进行长期监测研究和区域发展性评价,同时需要加强对高寒荒漠和高寒湿地等区域退化植被恢复的技术研究。

(3)过度放牧是导致青藏高寒区草地退化的主要人为因素之一,保护高寒草地与促进该区畜牧业经济发展是一对长期的矛盾,所以要在保护青藏高寒区生态系统、遏制草地退化现象以及进行退化草地恢复的前提下发展畜牧业经济,在对已有相关技术研究的基础上,加大草地畜牧业复合功能的研究,促进牧区经济的可持续健康发展。当下对高寒草地生态系统的综合治理体系以及恢复技术、草地的合理利用和集约化畜牧业生产模式的研究刻不容缓。

(4)对于青藏高寒区退化草地的恢复而言,当前的恢复措施大多局限于宏观层面,即使是多种恢复措施、技术的综合治理也存在着不足之处。随着技术的进步,在今后的工作中可以引入微观层面的恢复技术,例如微生物恢复技术,可以通过对退化草地微生物的研究,引入有利于草地恢复的微生物进入地下生态系统,与现有宏观措施一起发挥作用,从而加快草地恢复,优化草地质量。

参考文献(References):

- [1] You Q G, Xue X, Peng F, Xu M H, Duan H C, Dong S Y. Comparison of ecosystem characteristics between degraded and intact alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 133-143.
- [2] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张德镒. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [3] 张自和, 郭正刚, 吴素琴. 西部高寒地区草业面临的问题与可持续发展. *草业学报*, 2002, 11(3): 29-33.
- [4] 刘安榕, 杨腾, 徐炜, 上官子健, 王金洲, 刘慧颖, 时玉, 褚海燕, 贺金生. 青藏高原高寒草地地下生物多样性: 进展、问题与展望. *生物多样性*, 2018, 26(9): 972-987.
- [5] 张中华, 周华坤, 赵新全, 姚步青, 马真, 董全民, 张振华, 王文颖, 杨元武. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系. *生物多样性*, 2018, 26(2): 111-129.
- [6] 赵贯锋, 余成群, 武俊喜, 罗黎明, 苗彦军. 青藏高原退化高寒草地的恢复与治理研究进展. *贵州农业科学*, 2013, 41(5): 125-129.
- [7] 尚占环, 董全民, 施建军, 周华坤, 董世魁, 邵新庆, 李世雄, 王彦龙, 马玉寿, 丁路明, 曹广民, 龙瑞军. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展——兼论三江源生态恢复问题. *草地学报*, 2018, 26(1): 1-21.
- [8] 段敏杰, 干珠扎布, 郭佳, 高清竹, 万运帆. 施肥对藏北高寒草地植物多样性及生产力的影响. *西北农业学报*, 2016, 25(11): 1696-1703.
- [9] 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.
- [10] 葛庆征, 魏斌, 张灵菲, 卫万荣, 黄彬, 江小雷, 张卫国. 草地恢复措施对高寒草甸植物群落的影响. *草业科学*, 2012, 29(10): 1517-1520.
- [11] 刘兴元, 龙瑞军. 藏北高寒草地生态补偿机制与方案. *生态学报*, 2013, 33(11): 3404-3414.
- [12] 王建兵, 张德罡, 曹广民, 田青. 青藏高原高寒草甸退化演替的分区特征. *草业学报*, 2013, 22(2): 1-10.
- [13] 詹天宇, 侯阁, 刘苗, 孙建, 付顺. 青藏高原不同退化梯度高寒草地植被与土壤属性分异特征. *草业科学*, 2019, 36(4): 1010-1021.

- [14] 周丽, 张德罡, 负旭江, 董永平, 王加亭, 赵雅丽. 退化高寒草甸植被与土壤特征. 草业科学, 2016, 33(11): 2196-2201.
- [15] 周翰舒, 杨高文, 刘楠, 阚海明, 张英俊. 不同退化程度的草地植被和土壤特征. 草业科学, 2014, 31(1): 30-38.
- [16] 曹广民, 林丽, 张法伟, 李以康, 韩道瑞, 龙瑞军. 青藏高原高寒矮嵩草草甸稳定性的维持、丧失与恢复. 草业科学, 2010, 27(8): 34-38.
- [17] 肖玉. 青藏高原高寒草原不同退化程度植物群落特征与土壤养分的关系[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [18] 周华坤, 赵新全, 周立, 刘伟, 李英年, 唐艳鸿. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. 草业学报, 2005, 14(3): 31-40.
- [19] 赵玉红, 魏学红, 苗彦军, 其美, 扎旺. 藏北高寒草甸不同退化阶段植物群落特征及其繁殖分配研究. 草地学报, 2012, 20(2): 221-228.
- [20] 刘育红, 魏卫东, 杨元武, 张英. 高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析. 西北农业学报, 2018, 27(4): 480-490.
- [21] 魏卫东, 刘育红, 马辉, 李积兰. 三江源区高寒草甸土壤与草地退化关系冗余分析. 生态科学, 2018, 37(3): 35-43.
- [22] 杨元武, 李希来, 周华坤. 高寒草甸退化草地土壤特性分析(英文). 农业科学与技术, 2011, 12(8): 1221-1225.
- [23] 于宝政, 彭岳林, 蔡晓布. 藏北高原退化高寒草甸土壤团聚体有机碳变化特征. 草地学报, 2017, 25(6): 1212-1220.
- [24] 李建宏, 李雪萍, 卢虎, 姚拓, 王理德, 郭春秀, 师尚礼. 高寒地区不同退化草地植被特性和土壤固氮菌群特性及其相关性. 生态学报, 2017, 37(11): 3647-3654.
- [25] Fornara D A, Tilman D, Hobbie S E. Linkages between plant functional composition, fine root processes and potential soil N mineralization rates. *Journal of Ecology*, 2009, 97(1): 48-56.
- [26] 易湘生, 李国胜, 李阔, 陈吉龙, 裴志远. 长江源区草地植被退化对土壤持水能力影响. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 907-918.
- [27] 王学霞, 董世魁, 高清竹, 张勇, 胡国铮, 罗文蓉. 青藏高原退化高寒草地土壤氮矿化特征以及影响因素研究. 草业学报, 2018, 27(6): 1-9.
- [28] 温军, 周华坤, 姚步青, 李以康, 赵新全, 陈哲, 连利叶, 郭凯先. 三江源区不同退化程度高寒草原土壤呼吸特征. 植物生态学报, 2014, 38(2): 209-218.
- [29] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 曹巍. 三江源地区林草生态系统水源涵养服务评估. 水土保持通报, 2016, 36(3): 206-210.
- [30] 韦晶, 郭亚敏, 孙林, 江涛, 田信鹏, 孙光德. 三江源地区生态环境脆弱性评价. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1968-1975.
- [31] 龚斌, 甘小莉, 刘伟玲, 张林波, 陈婷, 巢世军. 基于 EOF 分析的三江源区植被覆盖变化时空分布特征. 地学前缘, 2013, 20(3): 234-239.
- [32] 李志斐. 气候变化对青藏高原水资源安全的影响. 国际安全研究, 2018, 36(3): 42-63.
- [33] 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征. 地理学报, 2008, 63(4): 364-376.
- [34] 谢颀, 熊成品, 刘寻续. 三江源地区水土流失成因、特点及防治对策. 中国水土保持, 2007, (11): 19-21.
- [35] 李成文. 青海地区草原鼠害的防治——以“三江源地区”为例. 中国畜牧兽医文摘, 2017, 33(9): 19-19.
- [36] 郭一楷. 三江源地区生物多样性保护探析. 资源节约与环保, 2016, (11): 148-148.
- [37] 冯文华. 三江源地区生态移民问题研究[D]. 北京: 中共中央党校, 2017.
- [38] 朱霞, 钞振华, 杨永顺, 张晓明. 三江源区“黑土滩”型退化草地时空变化. 草业科学, 2014, 31(9): 1628-1636.
- [39] 李令, 贺慧丹, 未亚西, 杨永胜, 罗谨, 李红琴, 李英年, 周华坤. 三江源农牧交错区植被群落及土壤固碳持水能力对退耕还草措施的影响. 草业科学, 2017, 34(10): 1999-2008.
- [40] 侯宪宽. 不同类型高寒人工草地土壤和植被变化特征研究[D]. 西宁: 青海大学, 2015.
- [41] 阎明毅. 三江源生态移民社区一年生人工草地混播试验. 青海畜牧兽医杂志, 2010, 40(5): 9-10.
- [42] 王长庭, 曹广民, 王启兰, 施建军, 杜岩功, 龙瑞军. 三江源地区不同建植期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2426-2431.
- [43] 赵健赞, 张晓华, 张波, 杨静. 基于 Landsat 的三江源区植被覆盖时空变化分析. 人民黄河, 2018, 40(7): 68-72, 77-77.
- [44] 冯亚杰. 2005-2015 年三江源地区玛沁县植被覆盖度变化分析. 大连民族大学学报, 2016, 18(5): 450-456.
- [45] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 刘璐璐. 基于目标的三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估及政策建议. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 35-44.
- [46] 徐新良, 王靓, 李静, 蔡红艳. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析. 地球信息科学学报, 2017, 19(1): 50-58.
- [47] 黄晓宇. 三江源国家生态保护综合试验区生态健康评价与生态补偿标准研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2017.
- [48] 王瑾. 青海湖地区草地退化现状分析. 科技展望, 2015, 25(26): 86-86.
- [49] 骆成凤, 许长军, 游浩妍, 靳生洪. 2000—2010 年青海湖流域草地退化状况时空分析. 生态学报, 2013, 33(14): 4450-4459.
- [50] 张宝成, 白艳芬. 青海湖草地生态现状及成因分析. 黑龙江畜牧兽医, 2015, (15): 142-144.
- [51] 张明, 崔军, 曹学章. 青海湖流域草地退化时空分布特征. 生态与农村环境学报, 2017, 33(5): 426-432.
- [52] 张佳宁. 祁连山北坡高寒草地退化现状及应对策略. 草业科学, 2014, 31(4): 776-781.
- [53] 闫月娥, 王建宏, 石建忠, 周晓雷, 吴小舟, 吕子君, 陈道军, 魏秀元, 李健, 朱燕. 祁连山北坡草地资源及退化现状分析. 草业科学, 2010, 27(7): 24-29.

- [54] 王涛, 高峰, 王宝, 王鹏龙, 王勤花, 宋华龙, 尹常亮. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议. 冰川冻土, 2017, 39(2): 229-234.
- [55] 李林栖, 马玉寿, 李世雄, 王晓丽, 王彦龙, 景美玲, 李松阳, 年勇, 韩海龙. 返青期休牧对祁连山区中度退化草原化草甸草地的影响. 草业科学, 2017, 34(10): 2016-2023.
- [56] 张涌. 遥感技术在青海湖地区生态环境脆弱性评价中的应用. 青海师范大学学报: 自然科学版, 2017, 33(4): 56-59.
- [57] 李世雄, 马玉寿, 年勇. 祁连山退化草地恢复及可持续利用技术. 青海科技, 2018, 25(3): 12-14.
- [58] 邱丽莎, 张立峰, 何毅, 刁振源, 陈有东. 2000—2017年祁连山植被动态变化遥感监测. 遥感信息, 2019, 34(4): 97-107.
- [59] 赵成章, 石福习, 董小刚, 任珩, 盛亚萍, 高福元, 杨文斌. 祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化. 生态学报, 2011, 31(1): 115-122.
- [60] 陶和平, 高攀, 钟祥浩. 区域生态环境脆弱性评价——以西藏“一江两河”地区为例. 山地学报, 2006, 24(6): 761-768.
- [61] 周才平, 欧阳华, 曹宇, 裴志永, 杨丁丁. “一江两河”中部流域植被净初级生产力估算. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1071-1076.
- [62] 尚占环, 姬秋梅, 多吉顿珠, 后源, 郭旭生, 丁路明, 龙瑞军. 西藏“一江两河”农区草业发展探讨. 草业科学, 2009, 26(8): 141-146.
- [63] 张华国. 试论新时期西藏“一江两河”农业生态流域资源开发和经济发展的生态环境问题及对策. 西藏农业科技, 2017, 39(2): 40-44.
- [64] 刘毅华, 董玉祥. 西藏“一江两河”中部流域地区土地沙漠化变化的驱动因素分析. 中国沙漠, 2003, 23(4): 355-360.
- [65] 田福平, 李锦华, 张小甫, 余成群, 张怀山, 黄秀霞, 王春梅. 西藏“一江两河”地区优良牧草及草坪草引种试验. 草业科学, 2010, 27(12): 73-81.
- [66] 毛飞, 张艳红, 侯英雨, 唐世浩, 卢志光, 张佳华. 藏北那曲地区草地退化动态评价. 应用生态学报, 2008, 19(2): 278-284.
- [67] 戴睿, 刘志红, 娄梦筠, 梁津, 于明洋. 藏北那曲地区草地退化时空特征分析. 草地学报, 2013, 21(1): 37-41, 99-99.
- [68] 王金枝, 颜亮, 吴海东, 康晓明. 层次分析法在藏北高寒草地退化研究中的应用. 应用与环境生物学报, 2019, 25(6): 1-12.
- [69] 成平, 干友民, 张文秀, 郑华伟, 匡瑜. 川西北草地退化现状、驱动力及对策分析. 湖北农业科学, 2009, 48(2): 499-503.
- [70] 李波, 邵怀勇. 气候变化与人类活动对川西高原草地变化相对作用的定量评估. 草学, 2017, (3): 16-21.
- [71] 马玉秀, 吴世仁. 甘南州高寒草地退化及草地资源可持续利用对策. 农业科技与信息, 2008, (8): 17-18.
- [72] Van Andel J V, Aronson J. Restoration Ecology: The New Frontier. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2012.
- [73] 尚占环, 董世魁, 周华坤, 董全民, 龙瑞军. 退化草地生态恢复研究案例综合分析: 年限、效果和方法. 生态学报, 2017, 37(24): 8148-8160.
- [74] 董全民, 赵新全, 徐世晓, 赵亮, 周华坤. 畜牧业可持续发展理论与三江源区生态畜牧业优化经营模式. 农业现代化研究, 2011, 32(4): 436-439.
- [75] 马玉寿, 董全民, 施建军, 孙小弟, 王彦龙, 盛丽, 杨时海. 三江源区“黑土滩”退化草地的分类分级及治理模式. 青海畜牧兽医杂志, 2008, 38(3): 1-3.
- [76] 赵新全, 周青平, 马玉寿, 董全民, 周华坤, 徐世晓, 施建军, 赵亮, 王文颖, 汪新川. 三江源区草地生态恢复及可持续管理技术创新和应用. 青海科技, 2017, 24(1): 13-19.
- [77] Zhou H K, Zhou L, Zhao X Q, Liu W, Li Y N, Gu S, Zhou X M. Stability of alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(3): 320-327.
- [78] 杨新国, 宋乃平, 李学斌, 刘秉儒. 短期围栏封育对荒漠草原沙化灰钙土有机碳组分及物理稳定性的影响. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3325-3330.
- [79] 王启基, 史惠兰, 景增春, 王长庭, 王发刚. 江河源区退化天然草地的恢复及其生态效益分析. 草业科学, 2004, 21(12): 37-41.
- [80] 王伟, 德科加. 不同氮肥及施氮水平对称多县高寒草甸生物量和养分的影响. 草地学报, 2015, 23(5): 968-977.
- [81] 魏学红, 杨富裕, 孙磊. 补播和施肥对藏北高寒退化草地的改良效果. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18155-18156.
- [82] 孙磊, 格桑拉姆, 王向涛, 魏学红. 藏北高寒退化草地免耕补播效果研究. 高原农业, 2018, 2(2): 162-166, 117-117.
- [83] You C M, Wu F Z, Gan Y M, Yang W Q, Hu Z M, Xu Z F, Tan B, Liu L, Ni X. Grass and forbs respond differently to nitrogen addition: a meta-analysis of global grassland ecosystems. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1563.
- [84] Song M H, Yu F H. Reduced compensatory effects explain the nitrogen-mediated reduction in stability of an alpine meadow on the Tibetan Plateau. New Phytologist, 2015, 207(1): 70-77.
- [85] 武高林, 杜国祯. 青藏高原退化高寒草地生态系统恢复和可持续发展探讨. 自然杂志, 2007, 29(3): 159-164.
- [86] 董全民, 周华坤, 施建军, 董世魁, 尚占环, 汪新川, 尚永成, 赵之重, 李世雄, 王彦龙. 高寒草地健康定量评价及生产——生态功能提升技术集成与示范. 青海科技, 2018, 25(1): 15-24.
- [87] 李自珍, 杜国祯, 惠苍, 岳东霞. 甘南高寒草地牧场管理的最优控制模型及可持续利用对策研究. 兰州大学学报: 自然科学版, 2002, 38(4): 85-89.
- [88] 王守顺, 于健龙. 围栏封育、人工补播措施对“黑土滩”退化草地生物量的影响. 湖北畜牧兽医, 2017, 38(11): 5-6.
- [89] 王国庆, 杜广明, 聂莹莹, 彭芳华. 我国围栏封育对群落特征影响的研究进展. 黑龙江畜牧兽医, 2017, (7): 75-77.

- [90] 白文丽, 胡发成, 李春涛. 天祝县草原围栏封育期限及利用模式效果研究. 畜牧兽医杂志, 2015, 34(5): 40-43.
- [91] 王万林, 王建华, 阿不都卡哈尔, 李超, 安沙舟. 高寒地区人工草地建植技术与效益初步分析. 草食家畜, 2011, (4): 58-61.
- [92] 字洪标, 刘敏, 阿的鲁骥, 胡雷, 王长庭. 三江源区不同建植年限对人工草地土壤微生物功能多样性的影响. 生态学杂志, 2017, 36(4): 978-987.
- [93] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau. *Ecology Letters*, 2004, 7(12): 1170-1179.
- [94] 贾幼陵. 关于草畜平衡的几个理论和实践问题. 草地学报, 2005, 13(4): 265-268.
- [95] 陈楠. 不同草地管理方式对高寒草甸草原植被特征的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [96] 王宏生, 鲍根生, 王玉琴, 尹亚丽, 杨有武, 刘生财, 朱秀莲, 宋梅玲. 不同草地管理措施对狼毒型退化草地植物生产力的影响. 草业科学, 2018, 35(11): 2561-2567.
- [97] 刘卓艺, 王晓光, 魏海伟, 张志委, 杨国姣, 胡艳宇, 吕晓涛. 氮素补给对呼伦贝尔草甸草原退化草地牧草产量和品质的影响. 应用生态学报, 2019. (2019-07-26) [2019-09-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13287/j.1001-9332.201909.003>.
- [98] 张杰琦. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落结构的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [99] 张建贵, 王理德, 姚拓, 李海云, 高亚敏, 杨晓玫, 李昌宁, 李琦, 冯影, 胡彦婷. 祁连山高寒草地不同退化程度植物群落结构与物种多样性研究. 草业学报, 2019, 28(5): 15-25.