

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2018.01.001

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

尚占环^{1,2,3*}, 董全民², 施建军², 周华坤³, 董世魁⁴, 邵新庆⁵, 李世雄², 王彦龙²,
马玉寿², 丁路明¹, 曹广民³, 龙瑞军¹

(1. 兰州大学生命科学学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 青海大学(青海省)畜牧兽医科学院草原研究所, 青海 西宁 810016; 3. 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, 青海 西宁 810008; 4. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 5. 中国农业大学动物科技学院, 北京 10083)

摘要:“黑土滩”是全球草地生态系统退化行为在青藏高原三江源区的特殊表现形式, 严重威胁着三江源区生态安全和草地畜牧业发展。该文在调研近10年290多个相关文献资料基础上, 综合分析了近10年内黑土滩研究和治理工作的主要研究进展。并进一步讨论了一些新的观点, 如“黑土滩二次发生”、“黑土滩的水热空洞效应”、“黑土滩人工草地暂稳态机制”等。作者建议针对黑土滩生态恢复, 发展黑土滩治理的“分区-分类-分级-分段”的技术体系; 研究更多植物物种组合(>10种)的混合群落构建技术; 研发启动和引导黑土滩人工草地自我恢复技术及近自然恢复模式; 组织开展第二次“黑土滩”本底调查工作; 完善低成本治理模式, 推动三江源生态建设的可持续性。

关键词:青藏高原; 三江源区; 黑土滩退化草地; 生态恢复; 生产功能; 生态功能

中图分类号: S812.8

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2018)01-0001-21

Research Progress in Recent Ten Years of Ecological Restoration for ‘Black Soil Land’ Degraded Grassland on Tibetan Plateau —Concurrently Discuss of Ecological Restoration in Sangjiangyuan Region

SHANG Zhan-huan^{1,2,3}, DONG Quan-min², SHI Jian-jun², ZHOU Hua-kun³, DONG Shi-kui⁴,
SHAO Xin-qing⁵, LI Shi-xiong², WANG Yan-long², MA Yu-shou², DING Lu-ming¹,
CAO Guang-min³, LONG Rui-jun¹

(1. The School of Life Sciences, State key laboratory of grassland agro-ecosystems, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu Province 730000, China; 2. The Institute of Rangeland Research, Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 3. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Key Laboratory of Restoration ecology of cold area in Qinghai Province, Xining, Qinghai Province 810008, China; 4. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 10083, China)

Abstract: The ‘black soil land’ degraded grassland is the unique result of global grassland degradation’s behavior in the Sanjiangyuan region of Tibetan plateau that had severely reduced the ecological function and pastoral industry in the Sanjiangyuan region. Based on the investigation of more than 290 publications and project reports in recent ten years, the authors reviewed the main studies and progresses in restoring engineering of ‘black soil land’ degraded grassland. This review discussed more about some new theory views, such as ‘black soil land’ second emergence, hydrothermal-hole effect of ‘black soil land’, temporary-steady state of ‘black soil land’ sown grassland etc. For the technique of restoration and rehabilitation, the author proposed some future technique, such as the technique system of ‘regional separation-vegetation classification-degradation degree-restoring phase regulation’, more species numbers mixed (>10) of seed materials for artificial plant community construction, human regulation of launching and inducing self-res-

收稿日期: 2017-07-07; 修回日期: 2018-03-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501906-2); 国家自然科学基金(41671508); 青海三江源生态保护和建设二期工程科研和推广(2017-S-1-06); 青海省重点研发与转化技术项目(2017-NK-149-2); 青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20)资助

作者简介: 尚占环(1978-), 男, 河北唐山人, 教授, 博士生导师, 主要从事草地生态学、生物多样性研究, E-mail: shangzh@lzu.edu.cn

toration for 'black soil land' sown grassland vegetation, and self-restoration ability and the near-nature restoration model, launching the second background of investigation for 'black soil land' in time, developing the low-cost model of restoration, then that can promote sustainable ecological building in the region Sanjiangyuan.

Key words: Tibetan plateau; Sanjiangyuan region; 'Black soil land' degraded grassland; Ecological restoration; Productive function; Ecological function

青藏高原“黑土滩”退化草地的治理工作在近 10 年得到了前所未有的人力、物力投入。尽管大范围的黑土滩治理很早就得到了开展,并列入政府的重点工程^[1],但仍没有遏制“黑土滩”退化草地的扩张态势。黑土滩造成了青藏高原草地生态系统大量水土流失,畜牧业生产功能丧失,因此“黑土滩”退化草地治理的巨大挑战一直摆在科技、管理、政府,以及当地农牧民面前^[2]。近 10 年来,从青海省三江源自然保护区,到国家三江源公园等一系列实质性生态建设行动,其中每个工程、科技任务的重要内容都有“黑土滩”治理工作,也取得了前所未有的成效^[3-5]。根据 2005 年,国务院批准《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》,在第一期工程(2005—2013 年)、第二期工程(2014—)中,黑土滩依然是生态治理的重点任务。近 10 年国家自然科学基金委也在专门针对黑土滩基础研究立项 8 个,总经费达到 422 万元(包括 1 个重点基金)。从青海省、国家科技部十一五、十二五科技支撑、十三五重点研发计划的重点内容看,黑土滩治理也是重中之重。同时,国家生态补偿工程在三江源区的一个重要目标就是要逆转“黑土滩”的扩张趋势。以青海大学(包括青海省畜牧兽医科学院)、中国科学院西北高原生物研究所、兰州大学、北京师范大学、中国科学院地理与资源科学研究所等科研团队,在近 10 中关于黑土滩研究、治理工程中,进行了大量的人力投入和平台建设。

10 年前大量关于黑土滩的研究与治理工作很多处于探索阶段。黑土滩治理工作的探索性很强,成功与失败都为后续工作提供了丰富经验^[6]。近 10 年中在诸多科技项目、生态工程支持下,黑土滩的研究产生了大量有用成果、技术模式、推广示范基地,并且给农牧民畜牧业经营理念、产业发展带来了很大改变^[7-8]。这些工作及研究成果有力的支持了青藏高原生态屏障建设和高寒牧区和谐发展。在关于“黑土滩”概念与范围的理解上,目前基本上同意研究人员最初的诠释,即“黑土滩”是高寒植被极度退化一种体现形式,是植被表层剥离后的次生裸地,在植被学上不具有发生学意义^[9-14]。因此“黑土滩”

只是形象性的称谓和名称,但由于“黑土滩”的典型性和严重性,近 10 年来这种称谓被固化下来,成为退化草地治理工程的典型代表,也推动了退化草地恢复与治理工作在青藏高原生态建设中的主流化^[15-16]。

作者在 10 年前关于“黑土滩”的进展报告中,对 2006 年以前的黑土滩发生学、治理工作进行了较系统总结^[12-14]。但在国家人力、物力投入黑土滩治理的近 10 年高峰期,“黑土滩”研究与治理工作究竟得到了哪些进展,需要再次进行梳理。从文献报道看,近 10 年(2006—2016 年)中文文献大量涌现约 400 篇,是 2006 年以前(40 年间,100 多篇)的 4 倍,英文文献大约有 40 多篇专门针对黑土滩研究。本文主要根据近 10 年相关科研人员的研究经历、文献报道、项目报告以及实地调查,总结 10 年来“黑土滩”研究与治理工作情况,为继续开展青藏高原三江源区生态恢复工作提供更多参考。

1 青藏高原“黑土滩”退化草地分布、面积近 10 年变化

1.1 分布区域

由于“黑土滩”是高寒植被极度退化后的一种称谓,不具备类型学、发生学含义^[9,12]。在具体概念定义,类型、生态学、生物学界定时候较难,因此其具体分布区域也难以确定。关于黑土滩最全面的本底调查是 2006 年完成的《三江源区“黑土滩”退化草地本底调查》项目,目前政府指导性文件、工程参考基本都根据该研究结果^[17]。除了该次调查,其他研究工作提及了很多关于黑土滩问题,也代表了黑土滩在这些地区的分布。目前黑土滩全面分布在青海省高寒草地区域,除了三江源区外,青海湖、祁连山区也都有分布^[18-19]。在甘肃省甘南地区^[20-25]、四川省西北部、西藏地区等地区也都有分布。根据实际调查,川西北石渠县,青海祁连县等地,更是黑土滩的集中分布区。因此,在青藏高原黑土滩治理工作中,在除三江源外,其他严重发生区也应该受到重视。

要确切获得近10年黑土滩分布变化缺乏详细调查依据,但是可以根据最近完成三江源生态工程评估结果,以及已有的报告推测黑土滩分布^[4,17,26-27]。黑土滩最典型表现是秃斑化,且在高寒草地退化呈中、重度以上,分布的草甸区一般都属于黑土滩,且也是鼠洞密度非常高的地区^[28-29]。黑土滩另外一个特征是土壤侵蚀严重区域,基本上在草甸分布区,土壤侵蚀严重区域都是属于黑土滩区域^[30-32]。况且,近些年黑土滩在山体上扩张趋势较严重。从海拔范围讲,总体上黑土滩的分布已经超越了以前认为的海拔区域(3 700~4 500 m),在海拔3 000~5 000 m的草地退化区域都出现了黑土滩。更详细的调查工作,应该结合遥感、光谱及地面植被调查建立精确的模型,为能够精准的遥感普查黑土滩提供技术支持,这样就可以快速、全面的监测黑土滩分布。秃斑化的体现在冷季更加明显,因此应该进一步加强冷季的黑土滩调查,建立冷季黑土滩遥感的精确模型。

1.2 面积变化

青海省重大专项《2005—2012年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估》的结果表明^[4],在2005—2012年间,三江源区高寒荒漠生态系统局部向草地生态系统转变,也就是在实际保护区域高寒荒漠植被覆盖度得到一定提高。三江源区的荒漠面积减少了492.61 km²,但总草地面积只增加了123.70 km²^[4]。张颖等^[33]对2001—2012年三江源区草地面积变化分析,也认为总体上草地面积增加了6 749 km²,主要由荒漠转化来。徐新良等^[5]认为三江源退化草地面积整体上已经降低,特别是中度退化草地减少幅度较大。总体上三江源区植被覆盖度提高主要是因为温性草原明显增加,三江源区的温性草原区域一般不分布黑土滩,因此黑土滩主要分布区域(高寒草甸区)并没有多大变化。这也证实了早期研究结论:“黑土滩确实难以恢复,短期内难以实现其恢复的状态,但是其退化蔓延却速度很快”^[12-13,34]。到2012年黑土滩治理了1.85×10⁵ hm²,按照2006年黑土滩本底调查的面积核算(49.089×10⁵ hm²)^[17],治理的面积非常小,况且实际中,治理后黑土滩二次发生也较多^[35]。三江源保护区外草地面积是逐渐减少的^[3]。黄麟等在2009年的报告中,认为长江源区的草地状态到2004年是一直退化加剧^[36]。刘纪远等在2013年关于三江源生态工程的评估报告中认为,三江源区并没有

提高该地区的土壤保持功能^[37],这种功能依赖于植被覆盖度,并且土壤维持主要在草甸、草原区,土壤流失亦主要是这些区域。黑土滩是三江源区土壤流失重要区域,可见黑土滩确实难以恢复。这种趋势估计难以在国家实施三江源保护区后很快得到逆转,况且黑土滩退化草地并非一般草地退化问题。因此,我们推测青藏高原的黑土滩退化草地总体上有一定增加,这除了在其他地区新发现的黑土滩外,仅在三江源区应该处于增加态势。

目前在三江源区一直使用《三江源区“黑土滩”退化草地本底调查》的研究结果表述“黑土滩”面积及分布区域,主要作为三江源退化草地治理相关工程的规划依据^[17]。朱霞等^[38]通过遥感对2000年、2007年、2011年达日县的三江源保护区核心区的黑土滩面积分析,发现2007年以前黑土滩是扩张态势,2011年以后是逐渐减少。安如等^[39]利用2008—2009年的遥感信息判断玛多县的黑土滩面积为1 592 km²。徐剑波^[40]利用遥感分析了玛多县草地变化,认为从1994年到2009年草地退化面积逐渐增加,2006年到2009年只不过退化速度降低,并认为是由于退牧还草和生态保护工程减轻了草地退化趋势。魏卫东和李希来^[41]通过在甘德县固定研究区发现从2009年到2011退化草地侵蚀面积是增加的,说明草地退化越来越严重。姜冲等^[42]分析了三江源区1956—2010年水土流失变化,发现2005—2010年间长江源区、澜沧江源区输沙量增加,黄河源区减少;但黄河源区土壤水蚀增加,说明荒漠化草地植被有所恢复,但退化草甸并没有得到恢复,也说明在2010年前草地退化情况肯定没有得到改善。刘晓东等^[43]对2000—2008年三江源区草地覆盖度变化进行了分析,认为总体植被覆盖度降低,但低覆盖度草地(60%以下)有减少趋势,并认为是由于《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》实施的作用。很显然该研究没有详细分析该规划实施情况,该规划的实施实际上是2005年,起作用应该在2008年以后。上述直接或间接的研究证据表明,黑土滩退化草地面积近10年来应该没有减少,应该仍然处于扩张态势^[44]。因此,三江源黑土滩治理工程难度越来越大,鉴于此我们建议尽快展开第二次“黑土滩”本底调查,应该特别重视“黑土滩二次发生”的新问题。

1.3 黑土滩退化草地带来生态负面作用

黑土滩退化草地给区域生态、生产、社会经济等

都带来负面效应。关于黑土滩退化草地产生的生态问题,近10年的研究,基本上延续了以前的研究路线和内容。主要包括造成水土流失、毒杂草扩张、畜牧业生产功能丧失、区域性社会经济系统紊乱,甚至造成生态难民,鉴于此“黑土滩”治理一直是三江源区生态建设的重点工作^[45-48]。高寒草地的黑土滩化总是伴随着毒杂草侵入和蔓延^[48-49],并且毒杂草蔓延产生一系列负作用,诸如通过释放有毒物质改变生态系统结构和功能^[50]。黑土滩造成土壤表层有机碳损失在60%以上^[51-54]。三江源区高寒草甸黑土滩土壤水源涵养量比未退化草地损失 $121.28 \times 10^7 \text{ t}$ ^[55]。研究标明,随着秃斑块的面积扩大,水土流失、毒杂草扩张及鼠害活动增加同时互相促进^[28]。

有关黑土滩的作用,一些新的研究内容在近10年也出现。黑土滩由于失去植被覆盖作用,与未退化草地相比,地表温差大,温度变化速率大,造成水热散失及土壤可侵蚀性增加^[56-57]。在黑土滩发生区,由于植被消失、草皮层剥离、毒杂草蔓延,对生物多样性的影响很大^[58]。例如,苔藓类、菌斑、地衣在草地退化过程逐渐减少[从嵩草(*Kobresia spp.*)阶段开始],到黑土滩阶段已经很少(苔藓),甚至消失(黑斑、菌斑、地衣)^[59]。高寒草地的“黑土滩化”也减少了土壤动物种类和数量^[60],以及土壤微生物^[61-62]。高寒草甸退化黑土滩后,使得高寒草甸系统从碳汇转变成了碳源(全年 CO_2 净交换值从 -120.9 gCm^{-2} 变成了 $+11.6 \text{ gCm}^{-2}$)^[63]。

2 关于黑土滩研究的方法

2.1 常规的植被、土壤等方法技术

常规生态学研究方法依然是近10年的主流方法,主要包括植被、土壤、微生物、鼠害等方面的研究^[64-66]。常规的方法是野外确定研究地点、植被基本特征描述^[48,67]、实验室测试土壤、水文等基本信息^[4,68]。其他方法也都以常规方法为基础信息获取手段^[32],而且现在掌握的最有效的黑土滩基本信息也是以最常规方法获得的,例如三江源区黑土滩的本底调查、分类、分级体系的确立^[64]。梁海东^[69]采用植物和土壤脂肪酸对退化草地进行分类,是一种新尝试。在常规方法中,存在主要植被调查和野外取样的设计问题,目前在关于“黑土滩”的研究报道中,大多是以假重复的样地设计为主,尽管这种设计有些时候难以避免,比如大样区的多重重复设计在实

际研究中十分困难^[70-72]。但是,我们仍应尽可能多设计重复,并尽可能的远距离隔离重复,例如县域基础上的重复样地设计^[48],并且尽可能多获取样本量^[73],这样获得的结果更可靠。必须避免“黑土滩”研究中只用3个 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 小样方就能代表一个样地的植被调查,取3个土钻的土壤就能代表整个样地的土壤情况”。董世魁等^[74]认为高寒草甸、高寒草原退化草地调查的最小样地面积应该分别 82 m^2 和 81 m^2 ,才能获取较完全的代表性植物物种信息。

2.2 遥感及信息化技术

遥感信息化技术在以前也应用较多,近10年开始大范围在黑土滩的研究中广泛应用,最具代表性的是《三江源区“黑土滩”退化草地本底调查》中也采用了遥感技术^[17]。三江源区“黑土滩”退化草地遥感调查中,将全部调查的植被分为4大类,11小类,其中“黑土滩”退化草地类有3小类(轻度、中度和重度黑土滩,都为天然草地草皮层消失,植被覆盖度覆盖小于60%以下的草地),并建议使用秋季或深秋的影像^[75-77]。刘晓玲^[78]采用了1997—2000及2004年的Landsat7 ETM+30米多光谱数据,1999、2002卫星影像数据(Spot)辅助资料(DEM、DRC和土地利用图等)研究了黑土滩遥感调查的技术问题。黄麟等^[36,30]、芦清水等^[44]、徐新良等^[79]、刘纪远等^[80]、邴龙飞等^[81]用TM/ETM影像分析了三江源生态系统及其退化草地变化,分别用了70年代、90年代和2004年的各28幅,MSS空间分辨率为80 m,其中能够判断出退化草地为裸土地是三江源区草地变化的一个重要方面。张小咏等^[82]认为上述遥感信息没有提取毒杂草型退化草地信息,可能会掩盖毒杂草型退化草地,并建议把毒杂草型退化草地的信息化作为今后工作重点。屈冉等^[83]认为杂草遥感监测应该采用高光谱技术,借助物种的微弱光谱差异做定量分析,识别杂草。

采用信息技术单独评估三江源区“黑土滩”变化的研究报道较少,通过三江源区整体性评估研究,可以得到关于三江源区草地植被变化信息^[33,84-87]。李辉霞等^[84]用NDVI、气候资料评估了三江源区2001—2010年植被变化认为,气候变化贡献该区域植被覆盖度增加达79.32%,而人类活动(主要为生态建设工程)贡献了21.68%的植被覆盖度增加。李晓雪等^[88]采用改进多端元混合像元分解方法提取三江源区植被覆盖度信息,经预处理的地表类型

中将黑土滩归为土壤类型。李永花和王莲玉^[89]利用2.5 m或5.0 m分辨率的遥感影像进行三江源本底数据高分辨率调查,将黑土滩综合在三江源生态环境信息系统中。喻小勇等^[90]利用ASD Field-Spec HandHeld手持便携式光谱测量仪分析高寒草地光谱特征,发现退化草地在近红外760 nm反射率差别较大,可以作为退化草地分类的光谱依据。安如等^[91]利用改进的MESMA模型(多端元混合像元分解模型)判别黑土滩,夏季判别精度达到82.81%,并建议再利用秋季或深秋的数据分析,提高判别精度。安如等^[39]进一步利用一阶微分法、连续统去除法和归一化微分比的方法对“黑土滩”草地植被光谱反射曲线进行了处理,但其结果对藏嵩草(*Koeleria tibetica*)、小嵩草(*Kobresia pygmaea*)识别精度较高,对毒杂草的识别精度较低。李作伟等^[92]采用GIMMS和MODIS,结合三江源18个气象台站30多年的资料,分析三江源区植被变化,表明2000年以后人类对植被影响正面效应突出,但到了2010年以后正面效应减弱,且在某些区域(达日、泽库、河南等县)人类活动造成植被减少的作用加剧。这3个县(达日、泽库、河南)也是黑土滩发生的集中地区,尤其是达日县,根据笔者每年实地调查情况看,黑土滩在该县扩大趋势很明显。王雪璐^[32]采用遥感及侵蚀模型分析了三江源区不同植被、土地利用情况下侵蚀程度。尽管上述遥感技术的研究没有专门针对黑土滩,但是这些研究都涵盖了黑土滩这个退化状态,并着重指出黑土滩退化草地变化较显著。

2.3 数量生态学及模型

专门应用数量生态模型研究黑土滩的报道,近10年也出现了很多,主要集中于分类、恢复模拟,以及变化机制方面^[34,93-104]。数量模型方法能够获得更多信息和机制解释,例如在黑土滩毒杂草扩展与更新机制尺度效应方面,毒杂草成体植株与幼苗在地表分布的尺度效应不同^[93]。任国华等^[98-99]主要采用数量方法建立黑土滩形成过程的植被与土壤变化过程关联模型。李媛媛等^[102],张勇等^[103-104]主要研究黑土滩形成过程的植被、土壤变化。尚占环等^[73-72]、李媛媛等^[96]主要利用数量方法分析黑土滩形成与恢复过程中植被与土壤种子库关系。

近10年有一些采用典型数量生态学方法研究“黑土滩”的工作。例如,李希来采用非度量多维尺度(Non-metric multidimensional scaling, nMDS)和层级分类模型(hierarchical classification),以及分

类和回归树(classification and regression tree, CART)方法研究三江源区175个黑土滩样地植被资料,分析黑土滩形成、恢复的模型^[34,97]。李学玲和林慧龙^[105]采用元胞自动机模型研究黑土滩秃斑变化趋势。魏茂宏和林慧龙^[106]采用了分形维数模型研究了黑土滩形成过程的土壤粒径(质地)、土壤侵蚀模数的关系。李慧梅和张安录^[107]则采用结构方程模型分析了三江源区牧户对草地退化的认知。

2.4 同位素技术应用

目前同位素技术在黑土滩研究中主要侧重于对黑土滩形成和恢复的机制研究,包括土壤侵蚀方面。张蕊^[108]采用¹⁵N同位素标记方法分析了黑土滩几种主要植物对氮素利用率的差异性,表明细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)比其他禾本科、嵩草等植物对氮素利用效率高。王雪璐^[32]采用¹³⁷Cs自然丰度方法结合遥感、气候数据,分析了三江源区土壤侵蚀度,其中涵盖了黑土滩,表明草地土壤侵蚀度比其他类型植被高。肖桐等^[109]也采用了¹³⁷Cs方法评估了退化草地土壤侵蚀模数变化,表明三江源区高寒草甸退化程度加剧了土壤侵蚀。英文文献没有关于黑土滩同位素方面的研究,建议在黑土滩毒杂草对土壤环境、微生物的影响方面可以开展同位素精确定量分析。

2.5 现代生物技术

现代生物技术中,分子生物学主要集中于土壤微生物方面的研究工作,关于黑土滩研究中分子生物学的应用目前较少。胡雷等^[61],杨希智等^[110]采用了磷脂酸方法分析了三江源退化草地及黑土滩人工草地土壤微生物结构,表明随着人工草地年限增加土壤微生物多样性逐渐提高。更加微观技术研究很少在黑土滩研究领域被应用,分子生物学技术在黑土滩恢复中应该更有发挥作用的方面,比如功能性土壤微生物研究方面。

3 黑土滩本底调查及分类、分级

在三江源区自然保护区一期工程支持下,2005年开展了第一次“黑土滩”退化草地的本底调查^[17],也是近10年来黑土滩治理、研究中常用的依据。在前文关于黑土滩分布、面积,以及其负面作用中,总结了黑土滩变化情况,大部分研究工作没有直接涉及黑土滩,而是将“黑土滩”作为一种草地退化状

态,体现在整个三江源区,以及青藏高原植被、生态系统变化中^[4,32]。

在关于“黑土滩”的进一步评估中,主要涉及到黑土滩分级确定,以及形成、恢复阈值、指标等方面。李学玲和林慧龙^[105]采用元胞自动机模型研究黑土滩秃斑变化趋势,认为黑土滩秃斑在逐渐扩大的第 7 年已经开始进入不可逆转变化发展态势。魏茂宏和林慧龙^[106]采用了分形维数模型研究了黑土滩形成过程的土壤粒径(质地)、土壤侵蚀模数的关系,认为土壤粒径分形维数为 2.81 时是黑土滩可自然恢复的阈值。李希来研究三江源区 175 个黑土滩样地植被资料,分析黑土滩形成恢复的模型^[34,97],认为黑土滩秃斑块在当前中度放牧率(60%)以下不会形成,而大于 60%的放牧率是其形成黑土滩的外在条件,完全去除干扰的情况下可能需要 50 年才能恢复,但在放牧干扰情况恢复可能需要 100 多年时间。李慧梅和张安录^[107]则采用了结构方程模型分析了三江源区牧户对草地退化的认知,发现黑土滩在选择 8 个指标中(植被覆盖度降低、生物多样性低、鼠害猖獗、黑土滩、毒杂草增加、草地生产力下降、草地群落演替、植株矮化)认知程度较高,说明黑土滩问题得到农牧民的普遍认识。

“黑土滩”的分类、分级是有效治理“黑土滩”的重要基础,近 10 年在黑土滩分级、分类方面基本上沿用过去的思路和方法^[91]。在《三江源区“黑土滩”退化草地本底调查》基础上,参与工作的相关研究人员利用该次数据将黑土滩分类、分级进行了细致的研究^[64,91,111]。杨文才等^[94]将植被覆盖度、优良牧草比例、毒杂草比例、地上生物量、土壤有机质含量作为参数,分析三江源区称多县的退化草地分类及等级,建议分为 5 个等级(未退化、轻度、中度、重度、极度)。朱秀莲^[95]通过聚类分析,发现三江源退化草地分类中“坡度”与退化草地类型关系紧密。张静等^[112]根据三江源退化草地调查结果进行聚类分析,认为一共有 9 种退化草地,但在具体描述中没将黑土滩作为一种退化类型,而是以重度、极度退化草地形式表述。董全民等^[64],马玉寿等^[111]、潘多峰^[113]根据《三江源区“黑土滩”退化草地本底调查》数据资料,认为优良牧草比例、可食牧草比例、原生植被覆盖度、退化指示种比例、秃斑地盖度、啮齿类动物的危害,以及土壤 0~10 cm 有机质含量等指标,能够将三江源区退化程度分为 5 级(未退化、轻度退化、中度退化、重度退化和极度退化),并认为黑土滩的界定范围是秃斑地覆盖度大于 40%,按地形

分为 0~7°坡度,7~25°坡度和大于 25°坡度,黑土滩可分为 3 个亚等级(轻度黑土滩、中度黑土滩、重度黑土滩)。尚占环^[114]根据黑土滩植被表现外貌分为‘较高大型杂草群落’,‘低矮型杂草群落’和‘秃斑型’,这 3 类同时存在于生长季节,而非一般认为的秃斑型就是冬季景观,并在三江源区,一共调查到了 36 个群落类型(次生毒杂草群落)。黑土滩分类分级除了在学术和生态工程方面发展外,还应该制定使农牧民容易掌握的方案。

4 黑土滩形成过程与机制

4.1 几种新假说

近 10 年间,在黑土滩形成过程与机制方面研究也较多,基本上都围绕黑土滩形成过程开展一系列生物学、非生物学的动力机制,重点探明黑土滩形成过程生物、物理、生态等变化,为黑土滩的治理提供了有价值的参考^[114-115]。尚占环等^[93,114]提出了黑土滩形成的“三阶段”观点,及杂草主动侵入、被动侵入机制,毒杂草稳定维持机制,分析了鼠类活动异化草地植被繁殖体库和土壤养分的作用机制。并以秃斑块变化为核心提出了从秃斑块到草毡层孤岛化、干化的过程机制(图 1)。尚占环等^[116]提出黑土滩秃斑块的“水热空洞效应”假说,并在 2016 年获得国家自然科学基金资助进一步深入开展机制性研究(图 2)。韩立辉等^[28]提出秃斑块在黑土滩形成过程中的“负肥力岛”机制,也就是土壤养分流失集中区,并认为秃斑块达到 5 m² 小时,会造成与周边其他景观异质性降低。林慧龙等^[29]提出秃斑块的“热岛”效应机制。尚占环^[117,35]提出“黑土滩二次发生”问题,并研究了发生机制面临问题,指出“黑土滩二次发生”是青藏高原黑土滩治理的重大问题,必须得到重视,才能有效的实施“黑土滩”治理工作(图 3)。曹广民等以草毡层变化为核心提出高寒草甸主动、被动退化的两种动力,并在整体上将矮嵩草高寒草甸退化分为 4 个时期[异针茅(*Stipa aliena*) + 羊茅(*Festuca spp.*) - 矮嵩草(*Kobresia humilis*)群落、矮嵩草群落、小嵩草(*Kobresia pygmaea*)群落、杂类草“黑土型”次生裸地],3 个阶段(被动退化阶段、主动退化阶段、过渡阶段),同时根据草毡层碳储量分析出高寒草甸系统稳定的核心在于草毡层^[52,118-127]。曹广民研究团队上述研究是以草毡层为核心,但是该理论体系是跨生态、气候区的调查基础上形成的,因此是否具有普适性,也就是说任何青藏高原区域

的矮嵩草草甸的退化是否都遵循这一过程,特别是 草毡层的变化过程,需要更多实证。

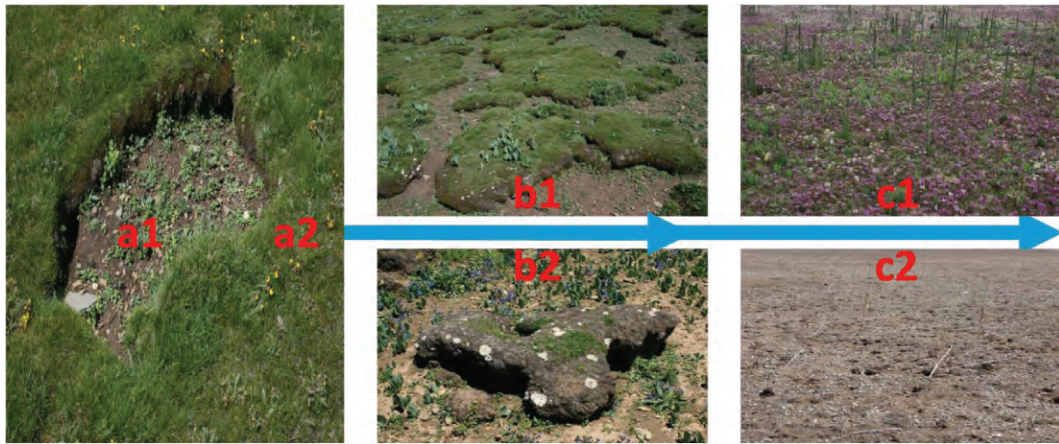


图 1 秃斑块扩张与“黑土滩”退化草地的形成过程示意图

Fig. 1 Dilatation of plaques and the formation process of degraded grassland in black soil land

注: a1 是 a2 草甸区域开始出现的秃斑块,在草地退化初始较少。b1 和 b2 是秃斑块在草地退化过程中逐渐增加、连通(b1),使得草甸草毡层成为干化的“孤岛”(b2),最后草毡层彻底消失(c2)。c1 和 c2 是高寒草甸的草毡层几乎全部消失,毒杂草占据生境,形成“黑土滩”退化草地,c1 为暖季景观(毒杂草滋生的群落),c2 为冷季景观(植被枯黄,黑色土壤裸露,故名“黑土滩”)。

因此认为黑土滩的秃斑块存在“水热空洞效应”,并有加速草地退化的作用^[128]。即在高寒草地中秃斑块是在地表形成了水热空洞,大量水热通过秃斑散失,引起秃斑区域、周边区域“根系-土壤-冻土”系统逐渐不稳定,进一步加速更多的草毡层干化、剥离,同时造成毒杂草侵入、蔓延(图 2)。黑土滩秃斑块在致密的草甸内产生后,会导致草地退化速度加快,至“黑土滩”退化草地的形成。致密的草甸退化后,水热异常是引起草甸下垫面的“土壤-冻土”系统不稳定的因

素^[129-133]。秃斑块的水热空洞效应主要应包括地表和土壤水分通过秃斑块的异常流动现象,热量在秃斑块裸露土壤中的异常收支(吸附、散失)。这两方面与秃斑块面积、形状、连通性,以及气象因素、土壤质地、秃斑周边鼠洞密度等变量都有密切关系,需要与周边草甸覆盖区域进行对比,才能更多的诠释秃斑块的水热空洞效应。秃斑块亦给啮齿动物在秃斑周边打洞、攻击草甸覆盖区域提供了有利条件,更加速了秃斑块的扩张^[34,100-101,115,122,134-136]。

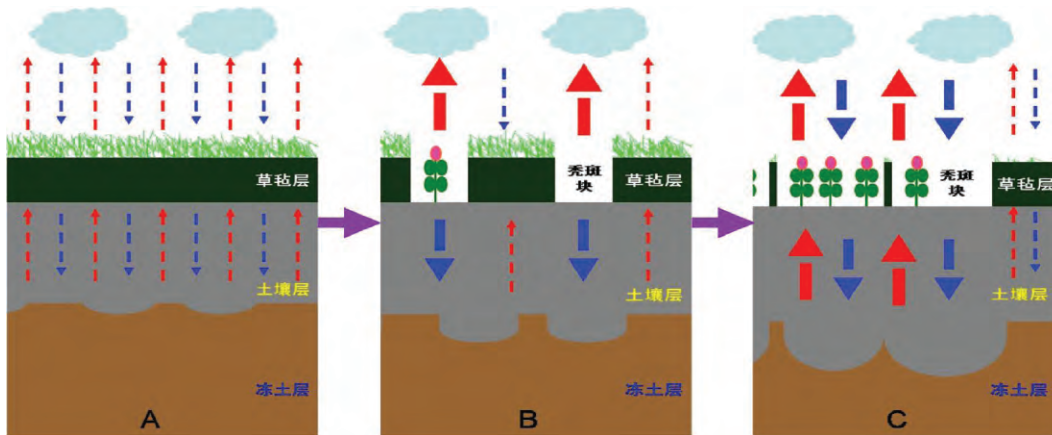


图 2 秃斑块的水热空洞效应及对“黑土滩”形成作用的假设示意图

Fig. 2 The hydrothermal-hole effect of bare patches and the assumption of the for,ation of black formation of black soil land

注:蓝色和红色虚线表示水热运动,线条的粗细模拟通量值。A 表示高寒草甸未产生秃斑块的水热收支状态。B 表示秃斑块增加了水热散失的空洞作用、毒杂草侵入,造成“草甸-土壤-冻土”系统不稳定。C 表示随着秃斑块逐渐扩张,更多的草甸草毡层干化、剥离,毒杂草群落增加,逐渐形成大面积的“黑土滩”退化草地。

4.2 植被与土壤养分互作

很多研究认为黑土滩土壤养分降低是植被减少的一个重要原因^[53-54,101,137-139]。事实上,在高寒草甸未退化植被去除草皮层(0~30 cm)后下垫面土壤情况与黑土滩相似,也就是说,草皮层大量根系及植被凋落物形成腐殖质与土壤的混合物,消失后其下垫面部分与黑土滩土壤是相当的^[6]。同时需要回答,未退化草甸草皮层下垫面土壤到底对上部植被有多少养分维持作用?为什么毒杂草能够在黑土滩生长^[28,93]?或许根本上以蒿草植物、禾草植物为主的群落难以很快的在黑土滩秃斑块上生长、发育,其原因应该是生境或水热环境的改变,而非养分问题,因为从现有的研究证实毒杂草对养分的需求并不比禾草、蒿草等优良牧草低^[65,67]。

4.3 与冻土退化之间关系

近 10 年对高寒草甸与冻土之间关系的研究较多,也逐渐理清了冻土与草地植被间互相依存关系的水热机制^[128-133,140-145],但其中针对黑土滩与冻土之间关系的研究并不多。冻土与草地退化之间互相作用以及引发的一系列生态问题已经得到重视,以王根绪为代表的研究团队在该领域从水热物理学、碳循环等角度开展了深入研究^[129,141]。从这个角度来看,黑土滩秃斑出现与冻土退化可能会互相激荡,扩大负面效应。但能够将二者很好结合起来的研究设计,需要拥有足够两方面专业知识同时能对二者有很好的理解。一般触及二者的研究人员都从一个方面推测另一方面的问题,但需要详细的实验证据,例如黑土滩秃斑块引起的热量散失对冻土的影响^[57]。黑土滩秃斑块土壤水分入渗速率高达 $52.86 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,而有草毡层的草甸仅为 $3.19 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[146],这对冻土下垫面水循环肯定有非常大的影响。早期研究认为冻土退化是黑土滩形成重要原因,这在作者 10 年前的综述论文中专门讨论过^[12-13],目前众多相关研究直接或间接的证明这一推测。梁四海等^[147]根据实验测定建立了黄河源区植被覆盖率与多年冻土埋深的关系,植被覆盖度在 60% 以下,冻土埋深急剧下降,而高寒草甸 60% 覆盖率基本上是黑土滩秃斑块进一步扩大开始。高植被覆盖度的土壤能够起到绝热作用,在冻融季节能够保护冻土减少受水热剧烈变化的影响,保护冻土稳定性^[148]。尤全刚等研究证实^[149],高寒草甸植被退化,土壤持水量、饱和导水率降低和导热率增加将加速地表水热交换,对高寒草甸草地退化

和下伏多年冻土消融都可能是正反馈。王一博等^[56]研究证实高寒草甸在 10~20 cm 土层的土壤含水量流失对高寒草甸土壤环境影响最大,这个土层恰恰就是黑土滩形成过程中的草毡层的剥离层。胡宏昌等^[150]研究发现多年冻土与季节冻土土壤水分对植被退化的响应不一样,多年冻土活动层 20~60 cm 的土壤含水量随着植被覆盖度减少而降低,而 60~80 cm 的土壤含水量增加;季节冻土 0~120 cm 的土壤含水量则都降低。就目前的研究结果来看,一般认为冻土区域的草地植被及草毡层有着隔热作用^[151-153],但黑土滩呈现斑块状的植被和草毡层剥离在不同尺度上与冻土水热关系,以及不同冻土类型的水热作用机制值得进一步深入研究。

4.4 毒杂草与鼠害

土壤侵蚀、毒杂草蔓延、鼠害增加等在一定程度上与秃斑块面积和空间态势有很大关系^[57,32,154]。毒杂草的作用在黑土滩形成过程中十分明显,同时也是影响黑土滩治理的重要问题。关于毒杂草的研究集中于毒杂草繁殖扩散及化感作用较多,延续了上个世纪 80 年代以来研究基础。近 10 年已经发表的研究报告表明,毒杂草土壤种子库、毒杂草引起土壤养分变化,以及化感作用有效的促进了毒杂草在黑土滩生境中滋生与迅速扩散^[50,70,73,87]。例如,土壤可萌发种子库在未退化草地,轻度,中度退化草地中都相对较少,但是在黑土滩中却迅速增加,但大部分组成是毒杂草种子库^[72],这与毒杂草种子主要都为小型种子有关^[67]。同时也支持了地上毒杂草更新幼苗的高密度发生^[71],这种毒杂草植物更新模式与毒杂草种子高效繁殖有密切关系^[70,155]。但是没有十分明确的量化证据证明毒杂草土壤种子库在黑土滩形成与恢复过程中扮演着重要角色,这与研究过程样品采集方法和种子库分析方法差别有关^[70,96],但是这些研究给出的对策则十分重要,也就是在黑土滩治理过程中要消耗毒杂草种子库,尽可能降低毒杂草种子库造成毒杂草再次爆发,引起黑土滩二次发生^[70-73,93]。

毒杂草化感作用是黑土滩初次形成及二次发生的重要生态学机制^[35]。近 10 年来,该方面主要集中于黑土滩毒杂草的化感物质分析,化感测试等,但在野外的实证研究仍需加强^[156-160]。垂穗披碱草(*Elymus nutans*)对主要黑土滩毒杂草(黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*),秦艽(*Gentiana macrophylla*),南山蒿(*Artemisia nanschanica*),黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*),瑞香狼毒(*Stellera*

chamaejasme), 密花香薷 (*Elsholtzia densa*), 白苞筋骨草 (*Ajuga lupulina*), 铁棒锤 (*Aconitum pendulum*) 的化感抑制作用的反应比较明显, 其中黄花棘豆化感抑制性最强^[161-163]。甘肃马先蒿 (*Pedicularis kansuensis*) 对垂穗披碱草的化感抑制作用比对其他禾草如青海冷地早熟禾 (*Poa crymophila* ‘Qinghai’), 同德老芒麦 (*Elymus sibiricus* ‘Tongde’), 青海中华羊茅 (*Festuca sinensis* ‘Qinghai’) 强烈^[164], 这也是甘肃马先蒿容易在垂穗披碱草人工草地爆发的重要原因^[158,165-166]。甘肃马先蒿

的防治可以采用化感抑制剂, 后源等^[167]发现黄花棘豆、南山蒿等黑土滩本地毒草的植物体化学提取物对甘肃马先蒿有较强的抑制作用, 并发现有效抑制剂: 倍半萜类化合物 (香橙烯环氧化物 ($C_{15}H_{24}O$))、异香橙烯环氧化物 ($C_{15}H_{24}O$) 和 6-(2-(3-羟基-1-丙烯)基)-4,8 α -二甲基-1,2,4a,5,6,7,8,8 α -八氢-2-萘醇 ($C_{15}H_{24}O_2$)。任元丁^[50]证实了黑土滩主要毒杂草 [南山蒿, 细叶亚菊 (*Ajania tenuifolia*), 黄帚橐吾] 残体在土壤中释放化感物质, 是毒杂草向土壤中释放化感物质的重要途径。

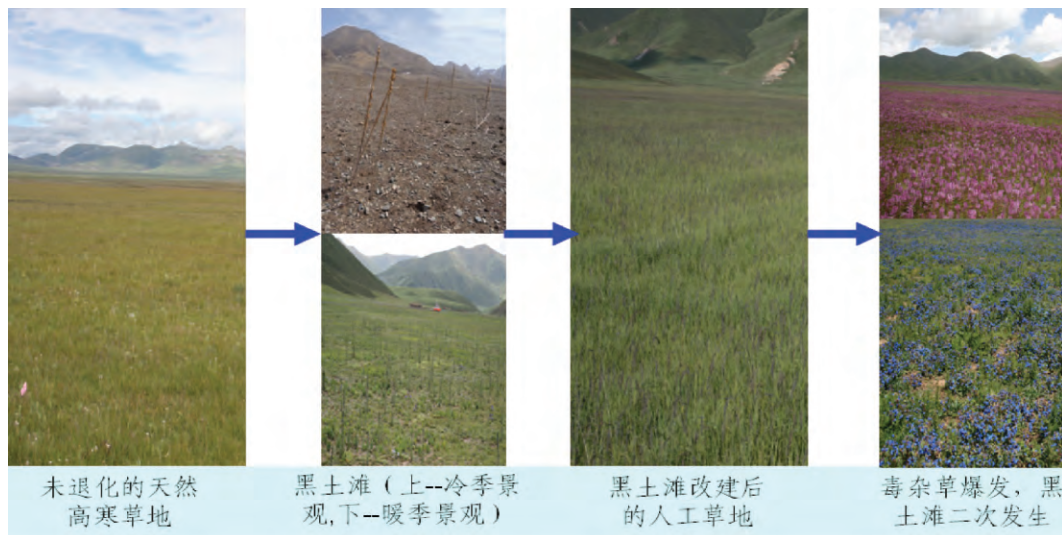


图 3 青藏高原“黑土滩”二次发生现象示意图

Fig. 3 A schematic diagram of the phenomenon of ‘black soil land’ second emergence in Qinghai-Tibetan Plateau

啮齿动物活动是秃斑块逐渐扩大的重要推动力, 这在黑土滩形成过程中的作用十分明显^[168-169]。对于啮齿动物、鼠类动物活动与黑土滩的形成, 基本上没有获得更多的进展。较多研究还是集中于鼠类动物活动与植被、土壤关系, 而且研究方法也还是采用鼠洞密度方法调查草地植被与土壤变化^[154,170-173], 来证实高强度的鼠类活动严重造成了草地退化, 特别是在鼠类活动区域首先形成黑土滩^[103,175]。贾婷婷研究认为, 高寒草甸有效鼠洞在 $320-624\text{ ha}^{-1}$ 时候, 高寒草甸土壤、植被能很好的协调发展, 过高和过低的密度对高寒草甸植被和土壤的耦合协调度会降低^[175]。

4.5 草毡层的作用

草毡层是维系青藏高原高寒草甸的根本, 草毡层的稳定是高寒草甸区域植被、冻土、碳库以及草甸生物多样性、生产性能维持核心^[10,12,14,59]。草毡层剥离、消失是黑土滩发生的重要标志和最终体现形

式, 因此关于草毡层与黑土滩关系科研人员关注了很久, 但是系统性的研究并没有开展。以曹广民课题组为代表研究团队在近 10 年对草毡层与黑土滩发生之间的关系开展了深入研究^[52,118-127,146,176], 并以草毡层为核心, 将碳库稳定性, 水热变化, 植被, 土壤结皮, 根系等与草甸演变进行了详细的实证分析。草毡层干化是草地退化的重要内在因素^[2,115,122,146,176-177]。野外观测表明, 秃斑块周边草毡层都出现干化现象 (图 1 a1, a2, b1, b2)。这种草毡层的干化使得土壤与草毡层之间固有的水热关系减弱, 加之草毡层水分减少, 最终秃斑块周边的草毡层死亡、逐渐剥离, 秃斑扩散 (图 1 b1), 使得草甸孤岛化 (图 1 b2)。

5 黑土滩退化草地生态恢复理论和技术

5.1 恢复的理论与应用

黑土滩退化草地生态恢复最初指导性理论来源

于退化分级,针对不同退化等级采用不同技术,随着退化程度加剧,越需要更多人工辅助恢复,以至于后来提出采用“人工草地改建”的技术恢复“黑土滩”,其根据是“黑土滩”已经失去自我恢复能力^[1,17,111]。“改建”这个词是作者在 12 年前进行博士研究论证会中,由胡自治教授提出的,后面逐渐出现相关报告中,现在逐渐得到学界认可。为了证实“人工草地改建”在恢复黑土滩中的作用,很多人开展了相关研究,并大量产生了“黑土滩人工草地”,作为一种人工植被出现在三江源区,以至于三江源区后续大量生态建设工作都围绕“黑土滩人工草地”开展^[178-181]。

采用高强度的农艺学措施建植人工草地的方式恢复黑土滩,目前仍然存在很大争论^[182]。主要问题在于改建的人工草地迅速退化问题^[183],为此国家自然科学基金委资助了一个自然科学基金项目《青藏高原三江源区“黑土滩”二次发生的地下过程及其内部驱动机制研究(编号:41171417)》,分析人工改建后黑土滩二次发生问题。其研究结果证实了改建人工草地迅速退化会确实引起黑土滩二次发生^[184];但在管理水平较高的情况下能够引导人工草地逐渐演替到较稳定的多年生植被阶段,促进其自我恢复,但这种管理投入较大,技术要求也较高^[15,108,182,185-186]。

针对黑土滩人工草地改建技术存在的问题,马玉寿课题组开展了种质资源选育、驯化,以及管理技术等一系列研究,最终获得了较理想的根茎型禾草作为黑土滩人工草地建植的较适宜牧草植物—青海草地早熟禾(*Poa pratensis* ‘Qinghai’)、青海冷地早熟禾(*Poa crymophila* ‘Qinghai’),并进行了大范围推广^[187-189]。黑土滩治理不能一刀切,在这种指导思想下,马玉寿等 2008 年提出分级、分类治理思想,并且在三江源区黑土滩本地调查结果支持下,其团队成员制定了一系列详细的技术规程,有力的支撑三江源区草地恢复工程的实施^[19,64,111,183,190-194]。

董全民等在实践中发现黑土滩人工草地 3~5 年期间暂稳态现象对于人工草地以后稳定性具有重要作用,提出了采用人工干扰维持其暂稳态的理论,提出混播黑土滩人工草地冬季利用率在 40~60%,并采用施肥、毒杂草防除和鼠害防除方法能够维持人工草地稳定性^[183]。很多关于黑土滩人工草地稳定性的研究都基于在青海省玛沁县大武滩试验地的工作基础^[195-198]。该示范地已经进行了近 20 年的研究工作,在较好的管理下已经演替到很好的阶段,并且已经形成致密的草皮层,在试验地的很多区域原生植被已经逐渐恢复^[199-200]。李以康等调查发现

黑土滩人工草地在 11 年后经历杂草侵入,蒿草草甸斑块化发展,逐渐向顶级群落—禾草矮蒿草群落恢复演替^[121]。王彦龙根据青海省玛沁县大武滩试验地的人工草地植物营养型分析结果,认为黑土滩人工草地夏季属于碳氮营养型,冬季草地属于碳营养型^[200]。很多不同年限黑土滩人工草地土壤养分变化趋势都显示出‘V’形,这说明随着人工草地年限增加,能够使土壤得到一定恢复,尽管在短期内出现下降趋势,也表明人工草地短期内高生产力是以消耗地力为代价的,但合理的管理能逐渐促进草地恢复^[196,201-204]。

李希来基于大规模的样地调查采用数量模型方法研究了黑土滩退化草地恢复问题^[97]。在其一系列研究报告中,李希来指出黑土滩退化草地也能够恢复,但是对于不同退化程度的黑土滩恢复要求差异较大,通过模型模拟认为黑土滩退化草地在高强度放牧情况下 21 年后就能形成,而恢复需要在 50 年以上,而在一般放牧条件下,黑土滩的恢复则需要 115~500 年之间,因此他建议尽量降低干扰以提高黑土滩恢复速度^[100-101,34]。尚占环 2007 年提出辩证的看待黑土滩次生杂草群落,认为黑土滩也可能是高寒草甸正向演替的起始^[116],是高寒生态系统的循环过程,这种观点在野外实地观察中有一定的证据,例如实地调查发现很多秃斑块能逐渐恢复成逐渐蒿草草甸。因此,我们可能严重低估了蒿草群落和草毡层在黑土滩自我恢复过程中的恢复力,这方面需要更加详细研究论证。

5.2 生态恢复的种质资源

从上个世纪 80 年代开始,黑土滩治理的研究人员不断探索能够适用于黑土滩生态恢复的植物种质资源,这期间开展了大量实验工作,其中莎草、禾草,甚至豆科植物都被广泛应用于科研和实践中^[13,205-207]。但是最后逐渐放弃了莎草科、豆科植物,原因在于他们很难应用到黑土滩恢复中,豆科优良牧草难以在海拔 3700 m 以上高寒区域很好的生长繁殖,而莎草科植物在黑土滩条件下难以定植,种质材料难以获得。后来黑土滩人工草地的植物种质研究和开发的工作都集中于禾草植物。早期研究认为,禾草能够作为黑土滩恢复成蒿草植被的先锋植物^[207]。近 10 年来,在经过大量草种驯化,筛选之后,一系列适用于黑土滩的优良种质资源及其利用技术被大量的研究出来。生态功能应该作为黑土滩生态恢复种质资源筛选的重要指标,例如植物根系

结构(根生物量、须根条数、根长等)与形成的土草混合体抗侵蚀性、稳定性关系十分紧密^[208]。

最具代表性的新种质资源是青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾,应用时间长、最广泛的植物是垂穗披碱草^[187,188,209-212]。围绕着这些牧草的适应性、实用技术研究被广泛开展。青海畜牧兽医科学院在黑土滩治理种质资源驯化与适应性评价方面做了大量工作,先后对 50 多种本地植物及引进植物行了评估和应用示范^[185,213]。近几年更集中于生态型牧草植物驯化和应用,如梭罗草(*Roegneria thoroldiana*)、疏花针茅(*Stipa penicillata*)、麦薷草(*Elymus tangutorum*)、异针茅(*Stipa aliena*)、洽草(*Koeleria cristata*)、发草(*Deschampsia caespitosa*)、碱茅(*Puccinellia distans*)^[191,212-219]。马玉寿团队经过多年攻关研究,最终成功驯化成黑土滩治理优良生态型牧草—青海草地早熟禾^[220,212]。青海草地早熟禾、青海冷地早熟禾的驯化试验和示范的成功为黑土滩生态恢复工程提供了充足、有效的种质资源^[185,187-188,211-212]。

披碱草属 3 种主要牧草[(垂穗披碱草,多叶老芒麦(*Elymus sibiricus* ‘Duoye’),短芒老芒麦(*Elymus sibiricus* ‘Duanmang’)]人工种植的生长高峰期都在第 2~4 年,每平方米地上干物质都能达到 1000 g 左右,返青季节基本都在 4 月下旬^[215]。在玛沁县黑土滩中种植的 10 种早熟禾品种中[波伐早熟禾(*Poa albertii* subsp. *poophagorum*),青海扁茎早熟禾(*Poa pratensis* ‘Qinghai’),冷地早熟禾(*Poa crymophila*),草地早熟禾(*Poa pratensis*),高山早熟禾(*Poa alpina*),高寒肯塔基早熟禾(*Poa pratensis* ‘Kentucky’),草地早熟禾巴林(*Poa pratensis* ‘Balin’),康尼(*Poa pratensis* ‘Conni’),肯塔基,超优异(*Poa pratensis* ‘Merit’)],有 6 种从加拿大引入的不能越冬(高山早熟禾,高寒肯塔基早熟禾,草地早熟禾巴林,康尼,肯塔基,超优异),其他 4 种本地驯化的早熟禾都能很好的在黑土滩生长^[214]。评估的 8 种羊茅属牧草[(中华羊茅(*Festuca sinensis*),西北羊茅(*Festuca kryloviana*) (原文拉丁文有误,且根据拉丁文应该为‘寒生羊茅’),毛稔羊茅(*Festuca kirilovii*),紫羊茅(同德)(*Festuca rubra*),卡斯尔迪硬羊茅(*Festuca ovrina* ‘Carsd’),羊茅(*Festuca ovrina*) (根据原文拉丁文应该为‘羊茅’非‘寒生羊茅’),盍羊茅(*Festuca fascinata*)]中,后 4 种不能越冬,中华羊茅表现最好,适合作为黑土滩人工草地种植^[216]。经 4 年监测研

究发现,星星草(*Puccinellia tenuiflora*),洽草,发草等也能和羊茅、早熟禾等一样作为黑土滩改建人工草地的理想植物^[219]。异针茅也能作为黑土滩人工草地种植植物,适合作为生态草恢复黑土滩^[217]。在玉树地区黑土滩人工草地研究中,引入 15 种高寒地区的牧草都能正常生长,并能完成越冬和完整生育期,其中同德老芒麦和同德短芒披碱草表现最好^[222]。

不同牧草植物混合作为黑土滩人工草地建植材料应用较多,混播一般比单播稳定^[221]。在 2~6 种牧草混合播种中,4 种混合效果较好^[223],但是这个研究基于 1 年生长观测^[223]。马玉寿等^[179]报道了 3 年年限的黑土滩人工草地混播群落稳定性,发现较多物种组合建植的人工草地越来越表现出稳定性,5~6 种组合稳定性十分明显,推荐“垂穗披碱草+冷地早熟禾+中华羊茅+波伐早熟禾+西北羊茅+短芒老芒麦”作为黑土滩人工草地混播组合,同时 4 年的观测实验也证实了这一点^[197]。施建军等^[185]推荐 6 种牧草混播用来建植黑土滩人工草地(垂穗披碱草+青海草地早熟禾+青海中华羊茅+青海冷地早熟禾+碱茅+西北羊茅)。黑土滩恢复技术中,单播牧草植物应该在工程实施中被禁止,至少应该有两种牧草以上的混播。

5.3 人工辅助技术

在“黑土滩”恢复技术分类、分级为指导下,一共发展了 3 类技术,第 1 类是围栏封育,去除干扰依靠其自然恢复,适用于轻度退化草地;第 2 类是人工补播,除杂草,灭除鼠害,适用于中度退化草地;第 3 类是难以恢复极度退化黑土滩,采用人工改建成人工草地,并辅助围栏封育^[6,19,111,180]。事实上,这 3 类技术都需要人工帮助草地恢复,以促进其恢复演替。因此黑土滩生态恢复工程必须投入人力因素,才能达到目的^[64]。近 10 年中,人工恢复技术在前人的基础上越来越成熟,并且更加走向标准化,在大量研发项目支持下,与黑土滩治理有关的一系列专利、标准被发展起来,成为黑土滩治理技术体系的重要组成部分。

肥料一般在黑土滩人工草地建植和管理中广泛使用,为了满足人工草地短期积累大量生物量和根系对养分需求,也必须提供足够的肥料^[108]。黑土滩人工草地一般 3 年后土壤硝态氮下降 50%,应重视更有效的施肥技术,比如目前使用的 N 肥,很大比例并没有被植物吸收^[65-66]。腐熟羊粪作为底肥在

黑土滩人工草地中效果好,一般使用量为每公顷 2 000 kg^[194]。施建军等^[224]推荐在黑土滩人工草地最佳施用化肥(N、P)时间在分蘖至 7 月上旬。

基于农艺耕作措施在改建和补播恢复黑土滩过程中,存在草地表层高强度的人为干扰问题。马玉寿研究团队提出了采用免耕措施改建或补播恢复黑土滩,在黑河上游黑土滩治理中,免耕技术虽然在恢复植被方面效果差一些,但对于土壤的保护效果较好^[18-19]。黑土滩恢复技术体系中,免耕技术应该进一步深入研究,特别是关于较长年限的免耕技术效果研究。

恢复黑土滩的牧草植物种子丸粒化技术近几年被应用,主要由青海大学李希来团队实施^[225]。研究表明采用保水剂的青海冷地早熟禾、青海中华羊茅的丸粒种子在幼苗生长能力方面比裸种子效果好^[225]。采用羊粪和粘土(比例为 35% : 65% 效果最好)作为种子丸粒化材料在一定程度上提高高寒地区人工种植的牧草种子萌发率^[226-227]和生长状况,例如植株叶片数、株高和根长都有提高^[228-229]。高寒草地土壤也可以作为种子的包衣剂^[230]。种子微藻包衣可以提高幼苗植物根际土壤微生物活性和植物生长,改善植物生长环境^[231-232]。

用于改建黑土滩的人工草地采用一定灌溉措施能够降低杂草发生,同时能够提高优良牧草生物量^[233-236]。封育措施不论在哪种退化等级草地,都必不可少,在恢复过程中更需要一定的封育保护措施,免遭过度干扰^[237-239]。黑土滩人工草地可以采用一定程度上的放牧管理,提高物种多样性,促进植被更好发育^[186,193,198,240-244]。董全民等^[245]推荐在垂穗披碱草/星星草混播黑土滩人工草地上放牧强度为 9.97 头·ha⁻¹ 牦牛,对草地植被稳定和家畜生产都适宜。适当的刈割不仅能加速草地物质循环,还能减弱因繁殖生长带来的植株老化问题,提高黑土滩人工草地群落活力,并获得一定的饲草生产^[246-247]。

一般以黑土滩人工草地稳定性为目的的草地管理技术,包括毒杂草防除,鼠害防除,肥料使用,这些是最基本的农艺学调控措施^[185,248-250]。和其他技术相比,鼠害防控技术应该很好研发,以获得可持续的鼠害防控效果^[251-252]。杂草防除方面一直推荐的是化学防除,对于草地牧草而言化学药物选择性较差^[253]。对比黑土滩人工草地生产与生态功能效益,投入一定人工调控是双赢的投入,以 9 年的管理投入为例,随着年限延长投入产出比也增加,这是因

为随着黑土滩人工草地逐渐稳定,投入逐渐降低,但对管理人员技术水平要求较高^[254-256]。

5.4 近自然恢复与适应性调控

近自然恢复在三江源区生态恢复工作中已经被纳入国家十三五项目中^[257],并将作为重点发展技术体系,支持黑土滩退化草地的恢复和治理。近自然恢复强调遵循自然规律前提,人工促进创造环境恢复到原生状态,并在恢复过程中强调与周边环境的协调统一,消除过多的人工痕迹^[258-259]。已有的研究表明,黑土滩退化草地使用围栏封育自然恢复方法难以达到恢复目标,且最终形成了越来越稳定的毒杂草群落^[1],李希来的研究表明,极度退化黑土滩自然恢复可能要近 500 年时间^[97]。因此,人工干预的近自然恢复技术是解决黑土滩生态恢复问题重要途径之一,那么黑土滩生态恢复中近自然恢复技术体系应至少包括以下几个方面:(1)高丰富度的当地草地植物种子混合混播材料;(2)采用当地原料的土壤养分添加材料;(3)使用当地原料的地表覆盖、保持水土和种子材料;(4)可以采用移植当地草地表土和土草层方法进行恢复。对于黑土滩而言,土壤种子库捐赠技术(donor seedbanks)是其近自然恢复的重要方式,土壤种子库捐赠技术实际上涵盖了近自然恢复原则和技术途径^[178,260-262]。

适应性调控是黑土滩人工草地获得恢复性演替的重要途径,也是启动和引导黑土滩自我恢复的重要措施,这也是近自然恢复生态学的重要方面^[263]。从群落结构和功能变化角度看,黑土滩人工草地是生态恢复技术使用后形成的杂合型群落^[264],杂合型群落属于不稳定的群落,势必会不断发生变化,其变化受多种因素、机制交叉作用,在不同演替阶段主导机制不同^[181,196,265-266]。长期性观测研究是黑土滩人工草地可持续管理的重要基础,例如基于中长期的一些黑土滩恢复研究结果表明,黑土滩不同恢复技术处理下地上群落有着趋同演变趋势,且土壤系统也有恢复趋势,尽管群落结构有分层-分异现象^[181,201-203,267]。因此,基于恢复生态学的长期性研究才能获得有实践指导意义的有效技术^[268-269]。

5.5 黑土滩恢复效果的评估

近 10 年来,由于三江源生态工程实施,退化草地恢复工作迅速、大范围开展,建立了不同地点、恢复技术、规模的试验、示范实地样地,针对这些工作开展了很多相应的监测与评估,也包括三江源区的

整体评估^[4,25,110,270-273]。具体评估内容主要包括种质资源适宜性,土壤、植被变化趋势,土壤微生物,经济效益,生物多样性,碳汇等方面^[32,65-66,87,108,219,274-275]。这些评估对生态恢复的技术标准,规程,技术体系的完善提供了强有力的数据和信息支持。正是在这些评估基础上,才形成了今天较为完善的黑土滩恢复理论和技术体系,支撑推动着三江源区生态建设工程。根据现有的研究报告,就恢复技术而言,年限越长研究的从生态功能、生产功能恢复效果的评价越可靠,对技术的改进和完善越有参考价值^[269]。因此,在黑土滩恢复中应该特别注重长期研究样地的建立和持续性监测研究。

经济效益评估是黑土滩恢复治理的重要方面。事实上黑土滩治理重要一个方面是牧民生计问题的解决,也涉及到国家生态工程的民生功能,但黑土滩经济效益相关评估目前较少^[276]。陈敏等^[277]认为三江源区生态经济收益将随着风险因子值增加而减少,决策者所持风险态度对生态恢复方案的制定起着决定性影响。尹晓英和秦嘉龙^[268]提出黑土滩治理的生态补偿投入,直接从“基建支出”转入“待核销基建支出”,并未将其作为资产反映,既不能归集生态效益补偿的成本,也不能体现政府履行受托责任情况。周毛措和郑建宗^[278]基于投入产出的经济核算方法研究认为,在高寒地区重度~中度退化草地恢复中人工恢复比自然恢复效益高,而在中度~轻度退化草地恢复中自然恢复效益比人工恢复效益高。董全民等^[256]对比了黑土滩人工草地(混播,单播)及退化草地在9年间的经济效益、生态效益,建议将人工草地生态系统的价值核算纳入草地生态系统补偿性保护和恢复的决策过程中。施建军等^[254]分析了6年的黑土滩人工草地投入产出,结果表明在持续一定投入维持下黑土滩人工草地能够持续获得较高产出,且产出效益逐渐增加,这种效益驱动下,应该加强黑土滩人工草地建设和管理,获得生态、生产双赢。从上述仅有几个黑土滩恢复的经济效益分析案例可以看出,应该加强生态恢复的经济效益评估,特别是对不同技术、模式较长期的效益跟踪评估,才能更有效的支持国家在黑土滩治理上的正确投入^[128,279-280]。

6 研究展望与总结

恢复生态学的主流理论基本都应用到了黑土滩恢复治理工作中,并且已经形成了较成熟的理论、技

术体系。近自然的恢复理论目前逐渐成为主导生态恢复,特别是退化自然生态系统恢复工作的重要指导思想^[268],这对黑土滩人工干扰恢复提供了重要参考,在引导、协助黑土滩人工草地向恢复演替变化提供了明确目标。深入认识黑土滩在高寒草地生态系统结构和功能维持中的作用,特别是其自我恢复力的认识,促进受损植被自我恢复力提高,是以后三江源区生态修复的重要发展方向。特别应该加强对退化草地恢复技术实施对土壤功能影响的研究^[281-284]。在美国加利福尼亚大学伯克利分校一个有关未来生态环境保护的研讨会上,来自全球40多个生态、生物学家形成共识,提出面对全球变化和人口增长,环保主义者应该利用新形成的生态系统,注重维护生态系统结构与功能的多样化,增进生态系统的适应能力,而不应总是试图让生态系统维持过去的状态^[285]。把生态系统功能整合到生态恢复中,不能简单的满足于植被恢复^[286]。因此把治理黑土滩工程放到三江源区高寒草地畜牧业的生态-生产系统中,作为调控天然一家畜体系生态平衡的角色,更有助于可持续性的黑土滩治理^[13,279,287]。

黑土滩生态恢复技术已基本形成完善的体系,但在具体细节应该再进一步深入研究。例如,更多的种质材料混合技术,目前很少有超过6种牧草植物种类种子混合的案例,应该加强生态恢复种质资源开发和应用技术研究^[288]。一般超过20种的植物物种混合能够建立更加稳定的植被,并且对后续植被演替有着更加显著的积极作用^[289]。因此我们建议针对黑土滩人工草地建植开发多种多样的种质配方材料。黑土滩在人工恢复过程中应该注重分段调控技术的使用,在整个三江源区应该在分区基础上,建立分类、分级、分段的调控技术体系,完善“分区-分类-分级-分段”技术模式。人工干扰引导植被逐渐恢复是较难的过程,人工组装的群落很可能会出现意料之外的群落和演替方向,可控人工干扰是黑土滩生态恢复的研究重点^[287]。加强生物源控制剂研发应用,研究生态型控制毒杂草技术^[290]。就恢复成本而言,黑土滩恢复的人工改建技术成本还是较高,因此急需发展低成本的技术体系及模式,如发挥当地农牧民、企业的积极性是降低成本的重要机制^[128,279]。在总结以前的技术基础上,逐渐发展低成本的技术体系能够更有效的促进生态恢复工程实施^[291]。

综观近10年来,在国家三江源区自然保护区、国家公园等生态建设国家战略实施中,黑土滩恢复

和治理作为三江源区生态建设重点工程,相关研究工作得到了极大发展,不论从理论、技术、模式,还是从科技产出,人才培养都取得了前所未有的成绩。黑土滩作为全球草地退化行为在青藏高原的特殊表现形式,代表着自然植被生态退化的极端案例,因此其研究价值对生态学理论、生态恢复技术、生态系统持续管理等都有着极其重要的意义和参考价值。毕竟,目前三江源区 7000 多万亩黑土滩不可能都采用人工改建方式来进行恢复(成本高、后续管理需求太大,以及生态风险也较高),因此我们建议,将更多的科研平台、资源纳入到草地生态恢复行动中,发展多技术,多模式的生态恢复途径,有效推进三江源区生态建设。

参考文献

- [1] 马玉寿. 三江源区“黑土型”退化草地形成机理与恢复模式研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2006
- [2] 周华坤,姚步青,于龙,等. 三江源区高寒草地退化演替与生态恢复[M]. 北京:科学出版社,2016
- [3] 邵全琴,刘纪远,黄麟,等. 2005—2009年三江源自然保护区生态保护好建设工程生态成效综合评估[J]. 地理研究,2013,32(9):1645-1656
- [4] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J]. 地理学报,2016,71(1):3-20
- [5] 徐新良,王靓,李静,等. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析[J]. 地球信息科学,2017,19(1):50-58
- [6] 曹广民,龙瑞军. 三江源区“黑土滩”型退化草地自然恢复的瓶颈及解决途径[J]. 草地学报,2009,7(1):4-9
- [7] 马玉寿,董全民,施建军,等. 三江源区黑土滩综合治理技术集成与示范推广[Z]. 青海省科技进步一等奖,2013
- [8] 赵新全,周青平,马玉寿,等. 三江源区草地生态恢复及可持续管理技术创新和应用[Z]. 国家科技进步二等奖,2016
- [9] 马玉寿,郎百宁,王启基. “黑土型”退化草地研究工作回顾与展望[J]. 草业科学,1999,16(2):5-9
- [10] 李希来. 青藏高原“黑土滩”形成的自然因素与生物学机制[J]. 草业科学,2002,19(1):20-22
- [11] 周华坤,周立,赵新全,等. 江河源区“黑土型”退化草场的形成过程与综合治理[J]. 生态学杂志,2003,22(5):51-55
- [12] 尚占环,龙瑞军. 青藏高原“黑土型”退化草地成因与恢复问题的研究评述[J]. 生态学杂志,2005,24(6):652-656
- [13] 尚占环,龙瑞军,马玉寿. 江河源区“黑土滩”退化草地特征、危害及治理思路探讨[J]. 中国草地学报,2006,28(1):69-74
- [14] Shang Z H, Long R J. Formation causes and recovery of the ‘Black Soil Type’ degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Frontiers of Agriculture in China Front,2007,1(2):197-202
- [15] Dong Q-M, Zhao X-Q, Wu G-L, et al. A review of formation mechanism and restoration measures of ‘black-soil-type’ degraded grassland in the Qinghai-Tibetan plateau[J]. Environmental Earth Sciences,2013,70:2359-2370
- [16] Li X, Perry G, Brierley G J. Grassland ecosystems of the Yellow river source zone: degradation and restoration[M]. In: Brierley, G. J., Li, X., Cullum C., Gao, J (Eds.). Landscape and ecosystem diversity, dynamics and management in the Yellow river source zone. Springer. 2016
- [17] 马玉寿. 三江源区“黑土滩”退化草本地底调查—2005年度青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划科研课题及应用推广招标项目研究成果报告[R]. 青海省科学技术厅,2017
- [18] 李苗,马玉寿,李世雄,等. 黑河上游黑土滩退化草地植被恢复实验研究[J]. 青海畜牧兽医杂志,2015,45(6):7-10
- [19] 李苗. 分类恢复技术在大通河上游退化草地改良中的应用研究[D]. 西宁:青海大学硕士学位论文,2016
- [20] 江小雷,张卫国,杨振宇. 黑土滩恢复演替过程中植物功能群及牧草品质变化[J]. 草地学报,2008,16(6):619-623
- [21] 武高林,任国华,刘振恒,等. 黄河首曲湿地功能区“黑土滩”退化草甸恢复改良[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2009,45(4):48-52
- [22] 魏学红,孙磊,武高林. 青藏高原东缘“黑土型”退化草甸人工改良的土壤养分响应[J]. 水土保持学报,2010,24(5):153-168
- [23] 李光宇,陈文业,戚登臣,等. 黄河首曲玛曲县次生裸地的类型、成因、特征及其生态修复模式[J]. 西北农业学报,2012,21(6):134-139
- [24] 朱丽,赵明,李广宇,等. 黄河上游玛曲次生裸地类型及修复技术[J]. 中国水土保持,2012,(10):50-52
- [25] 杨林平,苏宝兰,杨文英. 黄河首曲高寒草甸退化草地(黑土滩)恢复重建优良牧草筛选试验[J]. 甘肃畜牧兽医,2016,46(11):96-98
- [26] 邵全琴. 三江源生态系统综合监测与评估[M]. 北京:科学出版社,2012
- [27] 石凡涛,马仁萍. 三江源自然保护区生态保护和建设工程总体规划“黑土滩”治理工程实施情况调查[J]. 黑龙江畜牧兽医,2013,(3):78-80
- [28] 韩立辉,尚占环,任国华,等. 青藏高原“黑土滩”退化草地植物和土壤对秃斑块面积变化的响应[J]. 草业学报,2011,20(1):1-6
- [29] 林慧龙,王钊齐,尚占环. 江河源区“黑土滩”退化草地秃斑与鼠洞的分形特征[J]. 草地学报,2010,18(4):477-484
- [30] 黄麟,邵全琴,刘纪远. 近 30 年来青海省三江源区草地的土壤侵蚀时空分析[J]. 地球信息科学学报,2011,13(1):12-21
- [31] 邵全琴,肖桐,刘纪远. 三江源区典型高寒草甸土壤侵蚀的¹³⁷CS 定量分析[J]. 科学通报,2011,56(13):1019-1025
- [32] 王雪璐. 青藏高原三江源高寒草地生态系统土壤侵蚀研究[D]. 兰州:兰州大学,2016
- [33] 张颖,章超斌,王钊齐,等. 气候变化与人为活动度对三江源草地生产力影响的定量研究[J]. 草业学报,2017,26(5):1-14
- [34] Li X L, Perry G L W, Brierley G, et al. Quantitative assessment of degradation classifications for degraded alpine meadows (Heitutan), Sanjiangyuan, western China[J]. Land Degradation & Development,2014,25:417-427
- [35] 尚占环. 青藏高原三江源区“黑土滩”二次发生的地下过程及其内部驱动机制研究[R]. 国家自然科学基金资助项目结题报

- 告, 2015
- [36] 黄麟, 刘纪远, 邵全琴. 近 30 年来长江源区高寒草地生态系统退化的遥感分析—以青海省治多县为例[J]. 资源科学, 2009, 31(5): 884-895
- [37] 刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 三江源生态工程的生态成效评估与启示[J]. 自然杂志, 2013, 35(1): 40-46
- [38] 朱霞, 钞振华, 杨永顺, 等. 三江源区“黑土滩”型退化草地时空变化[J]. 草业科学, 2014, 31(9): 1628-1636
- [39] 安如, 姜丹萍, 李晓雪, 等. 基于地面实测高光谱数据的三江源中东部草地植被光谱植被特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 202-211
- [40] 徐剑波, 宋立生, 赵之重, 等. 近 15a 来黄河源区玛多县草地植被退化的遥感动态监测[J]. 干旱区地理, 2014, 35(4): 615-622
- [41] 魏卫东, 李希来. 三江源区高寒草甸退化草地土壤侵蚀模型与模拟研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(7): 26-30
- [42] 蒋冲, 高艳妮, 李芬, 等. 1956-2010 年三江源区水土流失状况演变[J]. 环境科学研究, 2017, 30(1): 20-29
- [43] 刘晓东, 刘荣堂, 刘爱军, 等. 三江源区草地覆盖遥感信息提取方法及动态研究[J]. 草地学报, 2010, 18(2): 154-159
- [44] 芦清水, 黄麟, 吕宁. 三江源区东部 8 县草地退化格局分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 259-268
- [45] 于杰, 马良军, 谢飙. 三江源地区水土流失与贫困问题的思考[J]. 中国水土保持, 2007, (11): 26-28
- [46] 于秀娟, 燕琴, 刘正军, 等. 三江源区植被覆盖度的定量估算与动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1): 66-74
- [47] 余欣超, 周华坤, 姚步青, 等. 三江源区高寒鼠兔洞危害区植物群落特征研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(3): 107-112
- [48] 张蕊, 王媛, 马丽娜, 等. 三江源区退化人工草地、“黑土滩”和天然草地植物群落物种多样性[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1171-1178
- [49] 张伟, 孙海松. 黄河源区藏嵩草沼泽化草甸群落结构特征的研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2015, 33(1): 1-7
- [50] 任元丁. 青藏高原四种毒杂草残体对土壤中化感物质组成的影响[D]. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2013
- [51] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 等. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 263-269
- [52] 曹广民, 龙瑞军, 张法伟, 等. 青藏高原高寒矮嵩草甸碳增汇潜力估算方法[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6591-6597
- [53] 刘育红, 魏卫东, 温小成, 等. 三江源区不同退化高寒草甸土壤碳分布特征研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(2): 308-312
- [54] 杨永梅, 李惠梅, 高泽兵, 等. 三江源花石峡地区植被退化与土壤养分的关联[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 361-367
- [55] 徐翠. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响[D]. 北京: 中国环境科学院, 2013
- [56] 王一博, 王根绪, 吴青柏, 等. 植被退化对高寒土壤水文特征的影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 989-998
- [57] 魏茂宏, 林慧龙, 王钊齐. 江河源区高寒草甸退化序列秀斑热岛效应研究[J]. 中国草地学报, 2015, 37(1): 22-29
- [58] 刘艳书, 樊江文, 李愈哲, 等. 三江源区不同剥蚀退化草甸群落生物量与多样性特征[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 1-7
- [59] 李以康, 欧阳经政, 林丽, 等. 高寒草甸植被退化过程中生物土壤结皮演变特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2238-2244
- [60] 金生英, 严林, 马玉寿, 等. 三江源区人工草地中小型土壤动物群落特征及季节变化[J]. 草地学报, 2014, 22(5): 954-960
- [61] 胡雷, 王长庭, 王根绪, 等. 三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 8-19
- [62] 卢虎, 李显刚, 姚拓, 等. 高寒生态脆弱区“黑土滩”草地植被与土壤微生物数量特征[J]. 草业学报, 2014, 23(5): 214-222
- [63] 王斌, 李洁, 姜微微, 等. 草地退化对三江源区高寒草甸生态系统 CO₂ 通量的影响及其原因[J]. 中国环境科学, 2012, 32(10): 1764-1771
- [64] 董全民, 马玉寿, 许长军, 等. 三江源黑土滩退化草地分类分级体系及分类恢复研究[J]. 草地学报, 2015, 23(3): 441-447
- [65] 王文颖, 赵明德, 杨冲, 等. 人工草地氮素分流: 青藏高原野外 15N 示踪实验研究[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2016, (3): 71-79
- [66] 王文颖, 李文全, 周华坤, 等. 高寒人工草地土壤可溶性有机氮库和无机氮库动态变化[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 30-35
- [67] 张蕊, 徐松鹤, 任国华, 等. 黄河源区“黑土滩”退化草地 66 种草地植物种子大小统计特征[J]. 草地学报, 2015, 23(6): 1136-1144
- [68] 杨永海, 李惠梅, 高泽兵, 等. 三江源花石峡地区植被退化与土壤养分的关联[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 361-367
- [69] 梁海东. 利用植物和土壤脂类生物标记物对高寒草甸退化演替的判别分析研究[D]. 西宁: 青海大学, 2015
- [70] Shang Z H, Yang S H, Shi J J, *et al.* Seed rain and its relationship with above-ground vegetation of degraded Kobresia meadows[J]. Journal of Plant Research, 2013, 126(1): 63-72
- [71] Shang Z, Hou Y, Pan D, *et al.* Recruitment of seedlings versus ramets as affected by pasture degradation in alpine meadows and the implications for ecological restoration[J]. Plant Ecology & Diversity, 2015, 8(4): 547-557
- [72] Shang Z, Yang S, Wang Y, *et al.* Soil seed bank and its relation with above-ground vegetation along the degraded gradients of alpine meadow[J]. Ecological Engineering, 2016, 90: 268-277
- [73] Shang Z H, Deng B, Ding L M, *et al.* The effect of three years of fencing enclosure on soil seed banks and the relationship with above-ground vegetation of degraded alpine grasslands of the Tibetan plateau[J]. Plant and Soil, 2013, 364: 229-244
- [74] 董世魁, 汤琳, 王学霞, 等. 青藏高原高寒草地植物多样性测定的最小样地面积[J]. 生物多样性, 2013, 21(6): 651-657
- [75] 刘海军, 魏晓琴. 3S 技术在三江源区“黑土滩”退化草地调查中的应用[J]. 青海国土经略, 2007, (3): 29-31
- [76] 李永花, 王苑, 赵成福. 三江源区黑土滩的遥感图像解译[J]. 测绘技术装备, 2008, 10(4): 38-41
- [77] 王海燕, 许长军, 陈皓. 基于 3S 技术的三江源自然保护区土地利用方式变化的调查[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2010, 28(6): 49-52
- [78] 刘晓玲. 三江源自然保护区“黑土滩”退化草地调查[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2007, (1): 93-96
- [79] 徐新良, 刘纪远, 邵全琴, 等. 30 年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 829-838

- [80] 刘纪远,徐新良,邵全琴. 近 30 年来青海三江源区草地退化的时空特征[J]. 2008,63(4):364-376
- [81] 郝龙飞,邵全琴,刘纪远. 近 30 年黄河源头土地覆被变化特征分析[J]. 地球信息科学学报,2011,13(3):289-296
- [82] 张小咏,邵景安,黄麟. 三江源南部草地退化时空特征分析[J]. 地球信息科学,2008,10(5):645-650
- [83] 屈冉,李双,徐新良,等. 草地退化杂类草入侵遥感监测方法研究进展[J]. 地球信息科学学报,2013,15(5):761-767
- [84] 李辉霞,刘国华,傅伯杰. 基于 DNV1 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报,2011,31(19):5495-5504
- [85] 史展,陶和平,刘淑珍,等. 2012. 基于 GIS 的三江源区冻融侵蚀评价与分析[J]. 农业工程学报,2012,28(9):214-221
- [86] 徐剑波,宋立生,赵之重,等. 近 15a 年来黄河源地区玛多县草地植被退化的遥感动态监测[J]. 干旱区地理,2012,35(4):615-622
- [87] Li Y-Y, Dong S-K, Liu S, *et al.* The interaction between poisonous plants and soil quality in response to grassland degradation in the alpine region of the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Plant Ecology*,2014,215:809-819
- [88] 李晓雪,安如,吴红,等. 基于一种改进的多端元混合像元分解方法的三江源东部地区植被覆盖度信息的提取[J]. 遥感技术与应用,2011,26(3):383-391
- [89] 李永花,王莲玉. 三江源地区生态环境遥感动态监测地理信息系统数据整合实现[J]. 地理信息世界,2012,10(5):65-67
- [90] 喻小勇,邵全琴,刘纪远,等. 三江源区不同退化程度的高寒草甸光谱特征分析[J]. 地球信息科学学报,2012,14(3):389-404
- [91] 安如,徐晓峰,李晓雪,等. 黄河源玛多县“黑土滩”遥感定量判别[J]. 光学精密工程,2013,21(12):3183-3190
- [92] 李作伟,吴荣军,马玉平. 气候变化和人类活动对三江源区植被生产力的影响[J]. 冰川冻土,2016,38(3):804-810
- [93] 尚占环,龙瑞军,马玉寿,等. 青藏高原“黑土滩”次生毒杂草群落成体植株与幼苗空间异质性及相似性分析[J]. 植物生态学报,2008,32(5):1157-1165
- [94] 杨文才,吴新宏,石红霄,等. 基于 TWINSpan 分类的三江源区称多县高寒草甸退化研究[J]. 甘肃农业大学学报,2010,45(6):139-143
- [95] 朱秀莲. 三江源头黑土滩退化草地分级标准的研究[J]. 黑龙江畜牧兽医,2012,(9):86-89
- [96] Li Y Y, Dong S K, Wen L, *et al.* Soil seed banks in degraded and revegetated grasslands in the alpine region of the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Ecological Engineering*,2012,49:77-83
- [97] Li X. The spatio-temporal dynamics of four plant-functional types (PFTs) in alpine meadow as affected by human disturbance, Sanjiangyuan region, China[D]. Auckland: The University of Auckland,2012
- [98] Ren G H, Shang Z H, Long R J, *et al.* The relationship of vegetation and soil differentiation during the formation of black-soil-type degraded meadows in the headwater of Qinghai-Tibetan plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*,2013,69:235-245
- [99] Ren G H, Deng B, Shang Z H, *et al.* Plant communities and soil variations along a successional gradient in an alpine wetland of the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Ecological Engineering*,2013,61:110-116
- [100] Li X-L, Gao J, Brierley G, *et al.* Rangeland degradation on the Qinghai-Tibet plateau; implications for rehabilitation [J]. *Land Degradation & Development*,2013,24:72-80
- [101] Li X-L, Perry G, Brierley G, *et al.* Restoration prospects for Heitutan degraded grassland in the Sangjiangyuan [J]. *Journal of Mountain Science*,2013,10(4):687-698
- [102] Li Y Y, Dong S K, Wen L, *et al.* Assessing the soil quality of alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan plateau using a modified soil quality index [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,2013,185:8011-8022
- [103] Zhang Y, Dong S, Gao Q, *et al.* Responses of alpine vegetation and soils to the disturbance of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) at burrow level on the Qinghai-Tibetan plateau of China [J]. *Ecological Engineering*,2016,88:232-236
- [104] Zhang Y, Dong S K, Gao Q Z, *et al.* Climate change and human activities altered the diversity and composition of soil microbial community in alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Science of the Total Environment*,2016,562:353-363
- [105] 李学玲,林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列上“秃斑”连通效应的元胞自动机模拟[J]. 生态学报,2012,32(9):2670-2680
- [106] 魏茂宏,林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J]. 应用生态学报,2014,25(3):679-686
- [107] 李慧梅,张安录. 基于结构方程模型的三江源牧户草地生态环境退化认知研究[J]. 草地学报,2015,23(4):679-688
- [108] 张蕊. 高寒草地植物氮素利用与草地退化对土壤及根系碳/糖的影响[D]. 兰州:兰州大学,2015
- [109] 肖桐,邵全琴,孙文义,等. 三江源高寒草甸典型坡面草地退化特征综合分析[J]. 草地学报,2013,21(3):452-459
- [110] 杨希智,王长庭,字洪标,等. 三江源区不同建植年限人工草地土壤微生物群落结构特征[J]. 应用与环境生物学报,2015,21(2):341-349
- [111] 马玉寿,董全民,施建军,等. 三江源区“黑土滩”退化草地的分类分级及治理模式[J]. 青海畜牧兽医杂志,2008,38(3):1-3
- [112] 张静,李希来,谢得雄. 三江源地区不同退化草地聚类分析[J]. 草业科学,2008,25(6):8-13
- [113] 潘多峰. 三江源区“黑土型”退化草地的类型及等级划分标准研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2007
- [114] 尚占环. 江河源区“黑土滩”次生毒杂草植被形成过程及内部驱动机制研究. 国家自然科学基金资助项目结题报告[R]. 2009
- [115] 曹广民,杜岩功,梁东营,等. 高寒高草草甸的被动与主动退化分异特征及其发生机理[J]. 山地学报,2007,25(6):641-648
- [116] 尚占环,龙瑞军,马玉寿. 青藏高原“黑土滩”研究现状与思考 [C]//中国草学会青年工作委员会学术研讨会会议文集. 海口:中国草业青年学术研讨会组委会,2007
- [117] 尚占环. 青藏高原三江源区“黑土滩”二次发生的地下过程及其内部驱动机制研究[J]. 国家自然科学基金资助项目申请书,2011

- [118] 曹广民,林丽,张法伟,等. 青藏高原高寒矮嵩草草甸稳定性的维持、丧失与恢复[J]. 草业科学,2010,27(8):34-38
- [119] 曹广民,龙瑞军,张法伟,等. 三江源地区退化高寒矮嵩草草甸剥蚀坑的成因[J]. 草原与草坪,2010,30(2):16-21
- [120] 李以康,林丽,张法伟,等. 高草草甸退化和恢复过程中主要牧草演替和地表特征变化[J]. 草业学报,2010,19(5):179-185
- [121] 李以康,林丽,张法伟,等. 小嵩草群落-高寒草甸地带性植被放牧压力下的偏途顶级群落[J]. 山地学报,2010,28(3):257-265
- [122] 梁东营,林丽,李以康,等. 三江源退化高寒草甸草毡表层蚀过程及发生机理的初步研究[J]. 草地学报,2010,18(1):31-36
- [123] 林丽,曹广民,李以康,等. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草草甸碳过程的影响[J]. 生态学报,2010,30(15):4012-4018
- [124] 林丽,李以康,张法伟,等. 青藏高原高寒矮嵩草草甸退化演替主成分分析[J]. 中国草地学报,2012,34(1):24-30
- [125] 林丽,李以康,张法伟,等. 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量特征[J]. 生态学报,2013,33(17):5245-5251
- [126] 林丽,李以康,张法伟,等. 人类活动对高寒矮嵩草草甸的碳容量管理分析[J]. 草业学报,2013,22(1):308-314
- [127] 林丽,张德罡,曹广民,等. 高寒嵩草草甸植物群落数量特征对不同利用强度的短期响应[J]. 生态学报,2016,36(24):8034-8043
- [128] Shang Z H, Dong Q M, Degen A, *et al.* Ecological restoration on Qinghai-Tibetan plateau: problems, strategies and prospects[M]. In: Victor R. Squires (ed) Ecological Restoration: Global Challenges, Social Aspects and Environmental Benefits. NOVA PRESS, N. Y. 2016:151-176
- [129] 王一博. 江河源区冷生土壤环境对高寒生态系统变化的响应与环境效应研究[D]. 兰州:兰州大学,2017
- [130] Yang M X, Nelson F E, Shiklomanov N I, *et al.* Permafrost degradation and its environment effects on the Tibetan plateau: a review of recent research[J]. Earth-Science Reviews, 2010,103:31-44
- [131] Yang Z-P, Gao J-X, Zhao L, *et al.* Linking thaw depth with soil moisture and plant community composition: effects of permafrost degradation on alpine ecosystems on the Qinghai-Tibet plateau[J]. Plant and Soil, 2013,367:687-700
- [132] Wang G X, Mao T X, Chang J, *et al.* Impacts of surface soil organic content on the soil thermal dynamics of alpine meadow in permafrost regions: data from field observations[J]. Geoderma, 2014,232-234:414-425
- [133] Gu L L, Yao J M, Hu Z Y, *et al.* Comparison of the surface energy budget between regions of seasonally frozen ground and permafrost on the Tibetan plateau[J]. Atmospheric Research, 2015,153:553-564
- [134] Liu Y, Fan J, Harris W, *et al.* Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on net ecosystem carbon exchange of grassland in the Three rivers headwaters region, Qinghai-Tibet, China[J]. Plant and Soil, 2013,366:491-504
- [135] Sun F D, Chen W Y, Liu L, *et al.* The density of active burrows of plateau pika in relation to biomass allocation in the alpine meadow ecosystems of the Tibetan plateau[J]. Biochemical Systematic and Ecology, 2015,58:257-264
- [136] Qin Y, Chen J J, Yi S H. Plateau pikas burrowing activity accelerates ecosystem carbon emission from alpine grassland on the Qinghai-Tibetan plateau [J]. Ecological Engineering, 2015,84:287-291
- [137] Wen L, Dong S, Li Y, *et al.* The impact of land degradation of the C pools in alpine grasslands of the Qinghai-Tibet plateau [J]. Plant and Soil, 2013,368:329-340
- [138] Wen L, Dong S, Li Y, *et al.* Effect of degradation intensity on grassland ecosystem services in the alpine region of Qinghai-Tibetan plateau, China[J]. PLOS ONE, 2013,8(3):e58432
- [139] 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
- [140] 王根绪,沈永平,钱鞠,等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J]. 冰川冻土,2003,25(6):653-659
- [141] 程慧艳. 黄河源区高寒草甸覆被变化的水纹过程与生态功能响应[D]. 兰州:兰州大学,2007
- [142] 李元寿,王根绪,丁永建,等. 青藏高原高寒草甸区域土壤水分的空间异质性[J]. 水科学进展,19(1):61-67
- [143] Wang G X, Liu L A, Liu G S, *et al.* Impacts of grassland vegetation cover on the active-layer thermal regime, northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2010,21(4):335-344
- [144] 常娟,王根绪,高永恒,等. 青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响[J]. 生态学报,2012,32(23):7286-7301
- [145] 郭凤清,曾辉,丛沛桐. 三江源冻土型水库对典型高寒植物群落补水机理[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2016,36(4):268-375
- [146] 李婧,杜岩功,张法伟,等. 草毡表层演化对高寒草甸水源涵养功能的影响[J]. 草地学报,2012,20(5):836-841
- [147] 梁四海,万力,李志明,等. 黄河源区冻土对植被的影响[J]. 冰川冻土,2007,29(1):45-51
- [148] 程慧艳,王根绪,王一博,等. 黄河源区不同植被类型覆盖下季节冻土冻融过程中的土壤温湿度空间变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2008,44(2):15-21
- [149] 尤全刚,薛娴,彭飞,等. 高寒草甸草地退化对土壤水热性质的影响及其环境效应[J]. 中国沙漠,2015,35(5):1183-1192
- [150] 胡宏昌,王根绪,王一博,等. 江河源区典型多年生冻土和季节性冻土区水热过程对植被盖度的响应[J]. 科学通报,2009,54(2):242-250
- [151] Cheng H, Wang G, Hu H, *et al.* The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the headwater region of the Yellow river, China[J]. Environmental Geology, 2008,54:1755-1762
- [152] Hu H, Wang G, Liu G, *et al.* Influences of alpine ecosystem degradation on soil temperature in the freezing-thawing process on Qinghai-Tibet plateau[J]. Environmental Geology, 2009,57:1391-1397
- [153] Wang Y, Wu Q B, Tian L, *et al.* Correlation of alpine degradation and soil nutrient status of permafrost in the source re-

- gions of the Yangtze river, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67: 1215-1223
- [154] 王德利, 李心诚, 潘多峰, 等. 青藏高原草地鼠害的生态释义及控制[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2016, 42(3): 237-245
- [155] Wu G-L, Shang Z-H, Zhu Y-J, *et al.* Species-abundance-seed-size patterns within a plant community affected by grazing disturbance [J]. Ecological Applications, 2015, 25(3): 848-855
- [156] Shang Z H, Tang Y, Long R J. Allelopathic effect of *Aconitum pendulum* (Ranunculaceae) on seed germination and seedlings of five native grass species in the Tibetan plateau [J]. Nordic Journal of Botany, 2011, 29(4): 488-494
- [157] Shang Z H, Hou Y, Long R J. Chemical composition of essential oil of *Artemisia nanschanica* Krasch. from Tibetan plateau [J]. Industrial Crops and Products, 2012, 40: 35-38
- [158] Shang Z H, Xu S H. The primary allelopathic testing of *Pedicularis kansuensis* (Scrophulariaceae) on seed germination and seedling growth of two native grasses on the Tibetan plateau [J]. Pyton, International Journal of Experimental Botany, 2012, 81: 75-79
- [159] 任元丁, 尚占环, 龙瑞军. 中国草地生态系统中的化感作用研究进展[J]. 草业科学, 2014, 31(5): 993-102
- [160] Shang Z H, Hou Y, Li F, *et al.* (2017). Inhibitory action of allelochemicals from *Artemisia nanschanica* to control *Pedicularis kansuensis*, an annual weed of alpine grasslands [J]. Australia Journal of Botany, 2017, 65(4): 305-314
- [161] 唐燕, 尚占环, 李希来, 等. 高寒地区白苞筋骨草对几种禾草的化感作用[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2067-2072
- [162] 唐燕. 退化高寒草甸白苞筋骨草和铁棒锤对几种牧草的化感作用[D]. 西宁: 青海大学, 2008
- [163] 程晓月, 后源, 任国华, 等. “黑土滩”退化高寒草地 6 种常见毒杂草水浸液对垂穗披碱草的化感作用[J]. 西北植物学报, 2011, 31(10): 2057-2064
- [164] 魏卫东. 甘肃马先蒿化感作用对禾本科牧草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2010, 29(12): 48-51
- [165] 邱正强, 马玉寿, 施建军, 等. 甘肃马先蒿对“黑土型”退化草地垂穗披碱草人工草地的影响[J]. 草原与草坪, 2006(5): 26-29
- [166] 邱正强, 马玉寿, 施建军. 三江源区“黑土型”退化草地垂穗披碱草人工草地毒杂草危害性分析[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2006, 36(3): 1-2
- [167] 后源等. 青藏高原“黑土滩”常见毒草对甘肃马先蒿的化感作用[J]. 西北植物学报, 2011, 31(8): 1651-1656
- [168] 鲍根生, 王宏生, 王玉琴, 等. 高原鼢鼠造丘活动对高寒草地土壤养分空间异质性的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(7): 95-103
- [169] 鲍根生, 王宏生, 曾辉, 等. 不同形成时间高原鼢鼠丘土壤养分分配规律[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1824-1831
- [170] 孙飞达, 龙瑞军, 蒋文兰, 等. 三江源区不同鼠洞密度下高寒草甸植物群落生物量和土壤容重特性研究[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 111-116
- [171] 孙飞达, 郭正刚, 尚占环, 等. 高原鼠兔洞穴密度对高寒草甸土壤理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 378-383
- [172] 贾婷婷, 毛亮, 郭正刚. 高原鼠兔有效洞穴密度对青藏高原高寒草甸群落植物生态位的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 869-877
- [173] 张海娟. 影响高原鼠兔栖息地选择的生态因子研究—以青海省南部黄河二级支流小流域为例 [D]. 西宁: 青海大学, 2016
- [174] Wu X, Chai Q, Zhang J, *et al.* Impacts of burrows and mounds formed by plateau rodents on plant species diversity on the Qinghai-Tibetan plateau [J]. The Rangeland Journal, 2015, 37: 117-123
- [175] 贾婷婷. 高原鼠兔干扰与青藏高原高寒草甸植被和土壤的关系[D]. 兰州: 兰州大学, 2016
- [176] 杜岩功, 梁东营, 曹广民, 等. 放牧强度对高草草甸草毡表层及草地营养和水分利用的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(3): 146-150
- [177] 王建兵, 张德罡, 曹广民, 等. 青藏高原高寒草甸退化演替的分区特征[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 1-10
- [178] 尚占环. 江河源区退化高寒草地土壤种子库及其植被更新 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006
- [179] 马玉寿, 尚占环, 施建军, 等. 黄河源区“黑土型”退化草地人工群落组分配置技术研究[J]. 西北农学报, 2007, 16(5): 1-6
- [180] 马玉寿, 张自和, 董全民, 等. 恢复生态学在“黑土型”退化草地植被改建中的应用[J]. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(2): 91-97
- [181] Shang Z H, Ma Y S, Long R J, *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 (HAYYR) of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Land degradation & Development, 2008, 19(5): 554-563
- [182] 贺有龙, 汪海波, 祁彪. “黑土滩”中华羊茅栽培草地生产力动态[J]. 草业科学, 2014, 31(1): 200-204
- [183] 董全民, 马玉寿, 赵新全. 江河源区“黑土型”退化人工草地管理技术研究[J]. 草业科学, 2007, 27(8): 9-15
- [184] 尚占环. 青藏高原“黑土滩”退化草地秃斑块的水热空洞效应及其加速草地退化的机制[Z]. 国家自然科学基金申请书, 2016
- [185] 施建军, 洪绂曾, 马玉寿, 等. 人工调控对禾草混播草地群落特征的影响[J]. 草地学报, 2009, 17(6): 745-751
- [186] 刘德梅, 马玉寿, 张德罡, 等. 封育对“黑土滩”垂穗披碱草栽培草地群落结构和特征的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(10): 59-66
- [187] 杨慧茹, 马玉寿, 李世雄, 等. 不同生长年限青海草地早熟禾人工草地群落多样性研究[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2011, 41(4): 5-7
- [188] 杨慧茹, 马玉寿, 李世雄, 等. 青海草地早熟禾栽培草地植被特征及土壤物理性状动态[J]. 草业科学, 2011, 28(6): 910-915
- [189] 王彦龙. 三江源区黑土滩退化草地植被恢复研究进展[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2013, 43(26): 44-45
- [190] 王彦龙, 董全民, 马玉寿, 等. 刈用型黑土滩人工草地建植及利用技术规范[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2012, 42(1): 11-12
- [191] 王彦龙, 马玉寿, 施建军, 等. 麦宾草 (*Elymus tangutorum*) 栽培驯化研究初报[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2012, 42(3): 1-2
- [192] 施建军, 董全民, 马玉寿, 等. 生态型黑土滩人工草地建植及

- 利用技术规范[J]. 青海畜牧兽医杂志,2012,42(1):15
- [193] 李世雄,董全民,马玉寿,等. 放牧型黑土滩人工草地建植与利用技术规范[J]. 青海畜牧兽医杂志,2012,42(1):13-14
- [194] 闵星星,马玉寿,李世雄,等. 施肥对青海草地早熟禾人工草地种群结构的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志,2013,43(2):18-19
- [195] 王彦龙,马玉寿,孙小弟,等. 大武地区“黑土型”退化人工草地植被群落稳定性研究[J]. 青海畜牧兽医杂志,2007,37(2):29-31
- [196] Feng R Z, Long R J, Shang Z H, *et al.* Establishment of *Elymus natans* improves soil quality of a heavily degraded alpine meadow in Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327:403-411
- [197] 杨慧茹,马玉寿,施建军. 黑土滩混播人工草地种间竞争力的研究[J]. 青海畜牧兽医杂志,2010,40(5):1-3
- [198] Dong S K, Wen L, Li Y Y, *et al.* Soil-quality effects of grassland degradation and restoration on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76: 2256-2264
- [199] 王彦龙,盛丽,施建军. 黄河源区黑土滩人工草地牧草植物量及营养动态研究[J]. 青海畜牧兽医杂志,2014,44(3):1-3
- [200] 王彦龙,盛丽,施建军. 黄河源区不同黑土滩人工草地土壤水分动态研究[J]. 青海畜牧兽医杂志,2014,44(2):1-3
- [201] 王启兰,王长庭,刘伟,等. 三江源区不同建植年限人工草地植物群落与土壤微生物生理类群的变化[J]. 应用生态学报, 2009,20(11):2646-2651
- [202] 王长庭,曹广民,王启兰,等. 三江源区不同建植期人工草地植被特征及其余土壤特征的关系[J]. 应用生态学报,2007,18(11):2426-2431
- [203] 王长庭,龙瑞军,王启兰,等. 三江源区不同建植年代人工草地群落演替与土壤养分变化[J]. 应用与环境生物学报, 2009,15(6):737-744
- [204] 王学霞,董世魁,李媛媛,等. 三江源区草地退化与人工恢复对土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(4): 113-117
- [205] 李希来. 补播禾草恢复“黑土滩”植被的效果[J]. 草业科学, 1996,13(5):17-19
- [206] 李希来,黄葆宁. “黑土滩”退化草地补种黑草和高草试验初报[J]. 青海畜牧兽医杂志,1996,26(4):9-11
- [207] 黄葆宁,李希来. 利用高草属优良牧草恢复“黑土滩”植被试验研究报告[J]. 青海畜牧兽医杂志,1996,26(1):1-5
- [208] 罗春燕,吴楚,芦光新,等. 三江源区植物根-土复合体的抗拉拔力特征及其影响因素分析[J]. 水土保持学报,2014,21(5):260-266
- [209] 王柳英,毕玉芬,马玉寿,等. 耐寒新品种青海草地早熟禾的选育[J]. 中国草地学报,2010,32(6):16-20
- [210] 施建军,王彦龙,杨时海,等. 三江源区牧草引种驯化概述与思考[J]. 青海畜牧兽医杂志,2009,39(3):29-31
- [211] 杨时海,马玉寿,施建军,等. 青海草地早熟禾(*Poa pratensis* L. ‘Qinghai’) 近几年的研究进展[J]. 种子,2010,29(8): 50-52
- [212] 马玉寿,施建军,董全民,等. 适宜黑土滩栽培的牧草品种筛选研究[J]. 青海畜牧兽医杂志,2011,41(4):1-4
- [213] 李长慧,李淑娟,雷有升,等. 4种高原乡土禾草的抗旱生理比较[J]. 草业科学,2013,30(9):1386-1393
- [214] 施建军,马玉寿,王柳英,等. 黑土型退化草地人工植被早熟禾属10种牧草的适应性评价[J]. 青海畜牧兽医杂志,2006,36(4):14-16
- [215] 施建军,王柳英,马玉寿,等. 黑土型退化草地人工植被被碱草属三种牧草的适应性评价[J]. 青海畜牧兽医杂志,2006,36(1):4-6
- [216] 施建军,马玉寿. 羊茅属8种牧草在“黑土型”退化草地上的适应性表现[J]. 中国草地学报,2006,28(1):22-25
- [217] 施建军,马玉寿,王柳英,等. 异种茅栽培驯化初报[J]. 中国草地学报,2006,28(4):84-86
- [218] 施建军,张德罡,马玉寿,等. 野生疏花针茅驯化及生产性能研究[J]. 草原与草坪,2011,31(6):40-48
- [219] 汪新川,周华坤,雷占兰. 青海牧区8种矮禾草生产经济性状品比试验[J]. 黑龙江畜牧兽医,2015(2):101-107
- [220] 马玉寿,王柳英,施建军,等. 青海草地早熟禾(品种登记号:304)[Z]. 全国牧草品种审定委员会,2005
- [221] 侯宪宽,董全民,施建军,等. 相同建植年限的2种类型人工草地群落结构及物种多样性研究[J]. 草地学报,2014,22(5):961-965
- [222] 陈乐乐,施建军,王彦龙,等. 高寒地区禾本科牧草生产力适应性评价[J]. 草地学报,2015,23(5):1073-1079
- [223] 王柳英,毕玉芬,马玉寿,等. “黑土型”退化人工草地群落优化配置研究[J]. 青海大学学报(自然科学版),2007,25(3):1-5
- [224] 施建军,马玉寿,董全民,等. “黑土型”退化草地人工草地植被施肥实验研究[J]. 草业学报,2007,16(2):25-31
- [225] 李积兰,李希来,魏卫东,等. 干旱胁迫对青海冷地早熟禾和青海中华羊茅丸粒种子幼苗生长的影响[J]. 西北农学报, 2015,24(10):143-149
- [226] 芦光新,李希来,乔有明,等. 丸粒化处理对几种牧草种子萌发的及生理特性的影响[J]. 草地学报,2011,19(3):451-457
- [227] 芦光新,李希来,田丰,等. 羊粪和粘土在牧草种子丸粒化中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(5):55-58
- [228] 田丰,魏卫东,李希来,等. 三江源区禾本科牧草丸粒化种子种植比较研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(24):11489-11491
- [229] 魏卫东,李希来,田丰,等. 三江源区“黑土滩”植被恢复丸粒化牧草种植研究[J]. 湖北农业科学,2010,49(10):2492-2495
- [230] 苗矿伟,李希来,魏卫东,等. 丸粒化土壤对中华羊茅幼苗生理指标的影响[J]. 青海大学学报(自然科学版),2008,26(6):25-27
- [231] 刘迎春,刘志林,向焜恭男. 高寒退化草地恢复中种子包衣对土壤微生物和植物生长的影响[J]. 草业科学,2011,28(5): 717-720
- [232] 刘迎春,向焜恭男. 高寒退化草地恢复中种子包衣对出苗的影响[J]. 草业科学,2011,28(4):586-589
- [233] 景美玲,李润杰,马玉寿,等. 黑土滩人工草地植物量及土壤水分对灌溉的响应[J]. 青海畜牧兽医杂志,2012,42(1):7-8
- [234] 景美玲,李润杰,马玉寿,等. 黑土滩人工草地生物多样性及土壤水分对灌溉的响应[J]. 青海畜牧兽医杂志,2012,42(2):15-16
- [235] 景美玲,马玉寿,张金旭,等. 黑土滩人工草地植物群落及土壤

- 水分对灌溉的响应[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(11): 388-391
- [236] 张金旭, 李润杰. 微灌技术对环湖区退化人工草地的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(29): 120-123
- [237] 刘德梅, 马玉寿, 董全民, 等. 禁牧封育对黑土滩人工草地群落特征的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2008, 38(4): 10-12
- [238] 李媛媛, 董世魁, 李小艳, 等. 围栏封育对三江源区退化高寒草地植物光合作用及生物量的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(4): 621-625
- [239] 李媛媛, 董世魁, 李小艳, 等. 围栏封育对黄河源区退化高寒草地植被组成及生物量的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(2): 275-280
- [240] 董全民, 赵新全, 马玉寿. 放牧强度和放牧时间度高寒混播草地牧草营养含量的影响[J]. 中国草地学报, 2007, 29(4): 67-72
- [241] 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 放牧强度对高寒人工草地土壤有机质和有机碳的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2007, 37(1): 6-8
- [242] 董全民, 赵新全, 马玉寿. 放牧率对高寒混播草地主要植物种群生态位的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 1-6
- [243] 董全民, 赵新全, 马玉寿. 放牧强度对高寒混播草地土壤养分含量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 553-557
- [244] 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 放牧强度对高寒混播人工草地群落特征及地上现存量的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(1): 10-16
- [245] 董全民, 赵新全, 马有泉, 等. 垂穗披碱草/星星草混播草地优化牦牛放牧强度的研究[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 16-22
- [246] 邱正强, 马玉寿, 施建军, 等. 刈割对“黑土滩”人工草地植被的影响[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2006, 24(4): 16-17
- [247] 张金旭, 马玉寿, 施建军, 等. 刈割对江河源区混播草地牧草产量及品质的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(1): 92-96
- [248] 马玉寿, 施建军, 董全民, 等. 人工调控措施对“黑土型”退化草地垂穗披碱草人工植被的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2006, 36(2): 1-3
- [249] 杨慧茹, 马玉寿, 施建军, 等. 调控措施对“黑土滩”混播草地人工植被的影响[J]. 西北农学报, 2011, 20(6): 191-198
- [250] 施建军, 洪绂曾, 马玉寿, 等. 施肥和杂草防除对三江源区人工草地群落特征的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 724-728
- [251] 潘多峰, 马玉寿, 张德罡, 等. 高原鼠兔对退化草地人工植被稳定性的影响[J]. 草原与草坪, 2006(4): 49-51
- [252] 王加亭, 贡旭江, 苏红田, 等. “三江源”地区退化草地鼠害监测技术[J]. 草业科学, 2008, 25(8): 110-112
- [253] 施建军, 马玉寿, 董全民, 等. “黑土型”退化草地植被杂草防除试验报告[J]. 杂草科学, 2007, (2): 24-26
- [254] 施建军, 邱正强, 马玉寿. “黑土型”退化草地上建植人工草地的经济效益分析[J]. 草原与草坪, 2007(1): 60-64
- [255] 施建军, 邱正强, 马玉寿, 等. 模拟采食对“黑土型”退化草地混播人工植被的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2008, 38(5): 4-6
- [256] 董全民, 施建军, 马玉寿, 等. 人工调控措施下黑土滩人工草地的经济及生态效益分析[J]. 草地学报, 2011, 19(2): 195-201
- [257] 马玉寿, 周华坤, 邵新庆, 等. 2016. 三江源区退化高寒生态系统恢复技术与示范[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7078-7082
- [258] Tischew S, Kirmer A. Implementation of basic studies in the ecological restoration of surface-mined land[J]. Restoration Ecology, 2007, 15(2): 321-325
- [259] 顾岚. 基于土壤微生物工程技术的河流近自然治理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013
- [260] Van der, Valk A G, Pederson R L. Seed banks and the management restoration of natural vegetation [M]. Academic Press, 1989, 329-346
- [261] 刘琳. 冀北山地土壤种子库特征及其对植被自然恢复的作用[D]. 保定: 河北农业大学, 2012
- [262] 田启航. 基于捐赠土壤种子库的植被近自然恢复技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015
- [263] Kiehl K, Kirmer A, Donath T W, et al. Species introduction in restoration projects-Evaluation of different techniques for the establishment of semi-natural grasslands in Central and Northwestern Europe[J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11: 285-299
- [264] Hobbs R J, Higgs E, Harris J A. Novel ecosystem: implications for conservation and restoration[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2009, 24: 599-605
- [265] Dong S K, Wang X X, Liu S L, et al. Reproductive responses of alpine plants to grassland degradation and artificial restoration in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Grass and Forage Science, 2015, (70): 229-238
- [266] Tang L, Dong S, Sherman R, et al. Changes in vegetation composition and plant diversity with rangeland degradation in the alpine region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. The Rangeland Journal, 2015, 37: 107-115
- [267] 字洪标, 刘敏, 阿的鲁骥, 等. 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[J]. 生态学杂志, 2017, 36(4): 978-987
- [268] Auestad I, Rydgren K, Austad A. Near-natural methods promote restoration of species-rich grassland vegetation-revising a road verge trial after 9 years[J]. Restoration Ecology, 2016, 24(3): 381-389
- [269] 尚占环, 董世魁, 周华坤, 等. 退化草地生态恢复研究案例综合分析: 年限、效果和方法[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8148-8160
- [270] Wang X, Dong S, Sherman R, et al. A comparison of biodiversity-ecosystem function relationship in alpine-grasslands across a degradation gradient on the Qinghai-Tibetan plateau [J]. The Rangeland Journal, 2015, 37: 45-55
- [271] Tang L, Dong S, Sherman R, et al. 2015. Changes in vegetation composition and plant diversity with rangeland degradation in the alpine region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. The Rangeland Journal, 2015, 37: 107-115
- [272] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 三江源生态工程实施前后长江源区宏生态状况变化分析[J]. 地球信息科学, 2016, 18(8): 1069-1076
- [273] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 三江源地区林草生态系统水源涵养服务评估[J]. 水土保持学报, 2016, 36(3): 206-210
- [274] 侯宪宽, 董全民, 施建军, 等. 青海草地早熟禾单播人工草地群落结构特征及土壤理化性质研究[J]. 中国草地学报, 2015, 37(1): 65-69, 120
- [275] 李亚娟, 曹广民, 龙瑞军, 等. 三江源区土地利用方式对草地植物生物量及土壤特性的影响[J]. 草地学报, 2016, 24(3):

524-529

- [276] 伊晓英,秦嘉龙. 三江源生态效益补偿成本核算研究—以“黑土滩治理”工程为例[J]. 财会通讯,2015(19):87-89
- [277] 陈敏,王光谦,李永平,等. 基于条件风险价值的两阶段随机规划模型在草地生态系统恢复中的应用—以三江源区为例[J]. 中国科学:技术科学,2017,47(3):297-305
- [278] 周毛措,郑建宗. 高寒草甸类草地不同退化状态人工恢复与自然恢复经济分析[J]. 中国草食动物科学,2012,32(4):34-38
- [279] Shang Z H,Zhang R,Degen A,*et al.* Chapter 5. Rangelands and Grasslands in the Tibetan Plateau of China: Ecological Structure and Function at the Top of the World[M]. In: Victor R. Squires (ed) Rangelands along the Silk Road: NOVA PRESS,2017:65-101
- [280] Lu Q,Ning J,Liang F,*et al.* Evaluating the effects of government policy and drought from 1984 to 2009 on rangeland in the three rivers sources region of Qinghai-Tibet plateau[J]. Sustainability,2017
- [281] Dong Q M,Zhao X Q,Wu G L,*et al.* Response of soil properties to yak grazing intensity in a Kobresia prava-meadow on the Qinghai-Tibetan plateau, China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2012,12(3):535-546
- [282] Li Y,Dong S,Wen L,*et al.* The effects of fencing on carbon stocks in the degraded alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan plateau[J]. Journal of Environmental Management,2013,128:399
- [283] Li Y-Y,Dong S-K,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[J]. Geoderma,2014,213:178-184
- [284] 魏茂宏. 江河源区高寒草地放牧侵蚀能值模拟研究[D]. 兰州:兰州大学,2016
- [285] Barnosky A D,Hadly E A,Gonzalez P,*et al.* Merging paleobiology with conservation biology to guide the future of terrestrial ecosystems[J]. Science,2016,355(6325):594-603
- [286] Kollmann J,Meyer S T,Bateman R,*et al.* Integrating ecosystem functions into restoration ecology—recent advances and future directions[J]. Restoration Ecology,2016,24(6):722-730
- [287] Shang Z H,Gibb M J,Leiber F,*et al.* The sustainable development of grassland-livestock systems on the Tibetan plateau: problems, strategies and prospects[J]. The Rangeland Journal,2014,36:267-296
- [288] 景美玲,马玉寿,李世雄,等. 大通河上游16种多年生禾草引种试验研究[J]. 草业学报,2017,26(6):76-88
- [289] Chivers Ian H,Jones T A,Broadhurst L M,*et al.* The merits of artificial selection for the development of restoration-ready plant materials of native perennial grasses[J]. Restoration Ecology,2016,24(2):174-183
- [290] 后源. 青藏高原“黑土滩”毒杂草的化感作用及其对甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)的抑制作用[D]. 兰州:兰州大学,2011
- [291] Kimiti D W,Rigions C,Belnap J. Low-cost grass restoration using erosion barriers in a degraded African rangeland[J]. Restoration Ecology,2016,25(3):376-384

(责任编辑 贾 婉)