

DOI: 10.5846/stxb201909061864

李昂,王扬,薛建国,任婷婷,魏存争,田秋英,白文明,白永飞,黄建辉,姜勇,程玉臣,孙海莲,徐柱文,赵玉金,韩兴国.北方风沙区生态修复的科学原理、工程实践和恢复效果.生态学报,2019,39(20): - .

Li Ang¹, Wang Yang¹, Xue Jianguo¹, Ren Tingting¹, Wei Cunzheng¹, Tian Qiuying¹, Bai Wenming¹, Bai Yongfei¹, Huang Jianhui¹, Jiang Yong², Cheng Yuchen³, Sun Hailian³, Xu Zhuwen⁴, Zhao Yujin¹, Han X G. Principles, practices and effects of ecological restoration in the wind-blown sand hazards of North China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

北方风沙区生态修复的科学原理、工程实践和恢复效果

李 昂¹, 王 扬¹, 薛建国¹, 任婷婷¹, 魏存争¹, 田秋英¹, 白文明¹, 白永飞¹, 黄建辉¹, 姜 勇², 程玉臣³, 孙海莲³, 徐柱文⁴, 赵玉金¹, 韩兴国^{1,*}

1 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

2 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

3 内蒙古自治区农牧业科学院, 中国科学院内蒙古草业研究中心, 呼和浩特 010031

4 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021

摘要:北方风沙区位于欧亚草原的东部,是我国生态环境最为脆弱的地区之一,其在北方生态安全屏障和丝绸之路经济带建设中具有十分重要的战略地位。在国家一系列生态保育工程的支持下,该地区的生态环境得到明显改善。但是,由于受人类活动和全球气候变化的影响,该地区仍然面临着严峻的环境压力。在中国科学院科技服务网络计划(STS计划)等项目支持下,我们开展了北方风沙区土地沙化成因及退化土地空间分布研究,集成了北方风沙区重点脆弱区生态恢复的理论和体系,以内蒙古中部的阴山北麓地区、内蒙古浑善达克沙地和蒙辽交界的科尔沁沙地为重点研究区域,进行了高效人工草地建植、天然草地恢复和管理、沙化草地治理等相关工程技术的示范,开展生态恢复模式的效果跟踪监测和生态效益评估,确定生态恢复技术和模式的技术参数和指标,明确不同集成技术与模式在北方风沙区的适用区域和范围,为技术模式的推广应用提供科学依据。通过上述研究,可以为中央和地方政府制定生态系统管理和退化生态系统恢复政策、建立我国北方生态安全屏障提供决策依据,为生态修复产业提供技术指南,为相关研究提供全面系统的基础数据支撑。

关键词:沙化草地;生态修复;生态系统管理;植被建设

Principles, practices and effects of ecological restoration in the wind-blown sand hazards of North China

LI Ang¹, WANG Yang¹, XUE Jianguo¹, REN Tingting¹, WEI Cunzheng¹, TIAN Qiuying¹, BAI Wenming¹, BAI Yongfei¹, HUANG Jianhui¹, JIANG Yong², CHENG Yuchen³, SUN Hailian³, XU Zhuwen⁴, ZHAO Yujin¹, HAN Xingguo^{1,*}

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Inner Mongolia Research Center for Prataculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010031, China

4 School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

Abstract: Located in the eastern part of the Eurasian steppe, the wind-blown sandland regions in north China are one of the

基金项目:

收稿日期:2019-09-06; 修订日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:

most fragile ecosystem types. These ecosystems play strategically important roles in the construction of eco-security shelters and the Silk Road Economic Belt. Supported by a series of ecological conservation projects, the ecological environments in the region have greatly improved. However, because of ever-increasing anthropogenic disturbances and global climate change, this region is still facing serious environmental pressures. Under the support of a project entitled “Integration and Application of Ecological Restoration Technology in Key Fragile Ecoregions”, we carried out research on the causes of land desertification and the spatial distribution of the degraded lands. By doing this, we integrated techniques and methods for ecological restoration in these fragile areas. This project is part of the Science and Technology Service Network Initiative Project of the Chinese Academy of Sciences. We implemented engineering practices for ecological restoration in the north of the Yinshan Mountains, Hunshandake Sandy Land, and the Kerkyn Sandy Land. These practices included establishment of artificial pastures, adaptive management of natural grassland, and restoration of the degraded grasslands. By monitoring and assessing these practices, we identified and parameterized various models and techniques for the ecological restoration of desertified grassland in each of these regions. This research will promote the application of these techniques in the wind-blown sandland regions of North China. It will also provide a scientific basis for decision-making by the central and local governments to formulate ecosystem management and restoration policies, and provide technical guidance for the ecological restoration industry. These findings will also provide important information for relevant future research in this area.

Key Words: Sandy grassland, ecological restoration, ecosystem management, vegetation construction

在内蒙古高原及其毗邻地区,自然生态环境面临着气候变化和人类活动的双重压力。自 1860 年清政府垦殖北方草原以来,技术水平粗放低下的农牧业和迅速扩张的人口,导致了该区域森林和草地迅速退化,土壤侵蚀严重,自东向西形成了从内蒙与辽宁交界的科尔沁地区经蒙古高原南缘到陕西、阴山北麓的北方风沙区^[1](图 1)。尽管政府实行了三北防护林等政策,对北方风沙区进行治理^[2],但是由于农牧业的迅速扩张和气候的暖干化,在上世纪 90 年代之前,本区域的沙漠化面积仍然呈迅速扩张的态势,在世纪之交导致沙尘暴等灾害事件频繁发生,威胁京津城市圈的安全^[3]。

为应对严峻的环境危机,中央政府决定执行以退耕还林(草)和京津风沙源治理工程为核心的生态环境保育政策。这些政策通过中央财政转移支付,鼓励农民大量退耕,遏制了草地和沙地的开垦,促进了森林和草原的恢复^[4],实现了国有林场从采伐到保育森林资源的转变,以塞罕坝为代表的国家森林公园建立就是典型例证。在牧区,大量的围栏建设,稳定了牧民产权,调动了牧民保护草地的积极性。在一定时间内,稳定了草地载畜量,遏制了草地超载的加剧^[5]。政府也执行了一系列应急性的政策,比如禁牧、春季休牧和出栏补贴等。以上政策和行政手段,使得沙尘暴发生频次由一年几十次减少到一年数次,沙漠化得到有效控制,部分地区已经实现沙退人进,植被得到了显著性的恢复^[6-7]。因此,我国北方风沙带的生态治理,已经完成应急性干预阶段。按照习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”等生态文明建设的指导思想,我国北方风沙区的生态治理正在向着“生态优先、绿色发展”的目标迈进,以实现北方风沙区的适应性治理,实现生态保育和社会经济协同发展,实现联合国提出的可持续发展目标 2030^[8]。

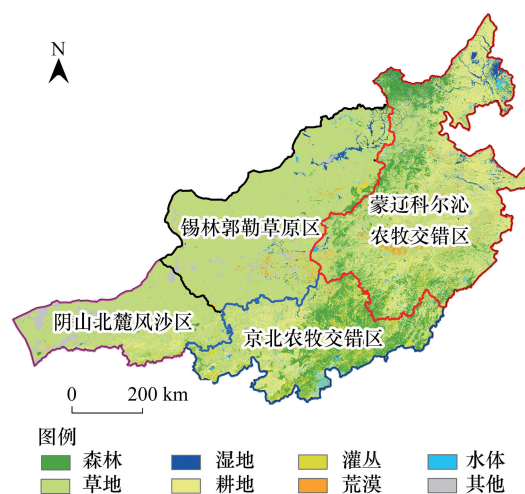


图 1 北方风沙区区域图

Fig. 1 Map of the wind-blown sandland regions in the North China

自 2017 年以来,在中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)“重点脆弱生态区生态恢复技术集成与应用”项目的支持下,我们协同科技部国家重点研发计划“北方农牧交错带草地退化机理及生态修复技术集成示范”、“锡林郭勒—乌兰察布高原沙化土地治理与沙产业技术研发及示范”和中国科学院学部咨询项目“北方草地农牧交错区禁牧政策适时调整研究”等相关课题,以内蒙古中部的阴山北麓地区、浑善达克沙地、蒙辽交界的科尔沁沙地地区为重点研究区域,从植物群落构成、水土耦合等角度解析了风沙区植被恢复的科学基础,试验和示范了高效人工草地建植、天然草地恢复和管理、沙化草地治理等相关工程技术,推广了高效绿色有机产业,实现了本区域草地和森林自然资源在保育和利用上的协调,为促进区域生态和社会经济协调发展,提供了整体性的解决方案。

1 北方风沙区可持续治理的科学基础

我国北方风沙区位于欧亚草原的东部,草牧业生产是本地区最主要的草地利用方式。在此区域,植物与草食动物通过长时间的协同进化,演化形成一系列耐牧的功能性状。因此,草食动物的放牧行为和植被的演替以及退化之间存在复杂的因果关系^[9]。内蒙古草原地区的放牧控制实验表明,适度放牧可促进植物的补偿性生长,有利于生产力和多样性的维持^[10-11]。高强度的放牧会导致植物群落退化、沙漠化扩张和生态系统服务功能的丧失^[12-14]。但是,如果完全隔绝放牧,退化草地在 10 年后,除了草地碳储量仍然保持缓慢增长外,生态系统生产力和物种多样性等大多数生态系统支持和调节服务指标的恢复逼近边际^[15]。随着我国生态制度的完善,沙地治理的推广和草畜平衡政策的普及,我国草地的超载率开始逐年下降^[16]。因此,在北方风沙区,我们的草牧业和生态系统管理理论,需要从退耕禁牧和沙地治理逐步转向草地的生态保育和合理利用。

为了实现协同生态保护与合理利用,首先要进一步强化草地生态系统多重服务作为草地可持续管理理论基础的理念。生态系统服务是指通过生态系统的功能直接或间接得到的产品(如食物、原材料)和服务(如维持生物多样性和调节自然灾害)^[17]。草地生态系统不但提供了牧草和肉奶产品等生态系统供给服务,还提供了包括促进土壤形成和养分循环、碳固持、气候调节、生物多样性维持、缓冲自然干扰和防止土壤侵蚀等生态系统支持和调节服务,以及文化和旅游休憩等服务。生态系统服务依赖于生态系统结构与过程,人类对生态系统供给服务的过度攫取,会导致生态系统的结构变化,造成生态系统支持和调节服务功能的显著下降、衰退甚至丧失^[17-18]。国家已通过立法确立了草地的多重生态系统服务理论的指导地位。2017 年,全国人大委员会在分组审议草原生态环境工作报告中,明确指出“草原具有生态和生产两种功能,兼具环境和资源双重作用;草原(保护)首先是生态,首先是环境”。因此,规避草地生态系统供给服务和调节服务之间的消长,促进二者之间的协同,是下一阶段草地生态系统管理的核心目标。在我国北方风沙区,实现草地生态系统供给服务和调节服务之间的协同,必须基于合理的生态工程技术方法和高效的产业模式。合理的生态工程技术,应当着眼于优化草地生态系统的群落结构、物种组成和养分循环等方面。

首先,在北方风沙区,由于群落结构较为简单,禾本科的优质天然牧草在群落中的比例偏低,不少豆科植物甚至仍在丢失状态,处于恢复中的生态系统是极度脆弱的^[19-20]。因此,草地生产力在气候变化的背景下,仍然处于极不稳定的状态。例如,2016 年,厄尔尼诺事件造成了内蒙古草原自 1953 年以来遭遇的最严重旱情。全自治区草场发生干旱灾害面积为 2225 万公顷,经济损失达到 115.9 亿元人民币。不仅乌兰浩特、锡林郭勒、赤峰等地受灾严重,就连向来水草丰美的呼伦贝尔地区也出现了 67 万吨左右的越冬草缺口。因此,恢复和提升天然草地的群落多样性,是稳定草地生产力和生态系统韧性的必要路径^[21]。以提升群落物种和功能性状多样性为目标,按照生活史、功能群、光合性状和根系性状对物种进行组合搭配,是实现草地生态系统结构和功能优化,生态系统服务水平协同和提升的重要技术手段。在此科学基础上,我们在北方风沙区开展了禾本科和豆科优质牧草的补播技术的试验示范。

其次,从生态化学计量学角度分析,牧草和畜产品的长期生产和外运,导致本来就匮乏的氮磷等大量营养元素和铁镁钼锌等与光合固氮过程密切相关的微量营养元素大量丢失。北方风沙区的养分匮乏是制约生态

系统生产力提升和导致生态系统结构退化的一个重要原因。大量养分添加实验表明,适当的养分回补,可以促进草地生产力的提升^[22]。尽管高剂量的养分(如氮)添加,会导致植物多样性降低^[23-24],但大量的证据也表明在达到最适阈值前,施氮仍然对草地物种多样性的维持具有积极作用^[22]。然而,由于化学肥料成本较高,且施肥后肥料挥发和淋溶损失严重,过度施肥后会导致不利的生态后果,因此实现兼顾经济可行性和生态恢复的养分回补方案是一个亟待解决的生态工程技术问题。基于此,我们在北方风沙区试验和示范了冬季少量施肥、施用缓释肥等技术,获得了较好的生态和经济效益。

第三,大量研究发现生态系统可能存在多个稳定状态,而且会在生态系统各个过程发生状态域转换(regime shift)^[25]。一旦生态系统发生状态域转换,该状态内的负反馈机制将会对生态系统功能过程产生约束作用^[26-27]。我国北方风沙区的土壤母质多为第三纪和第四纪深厚的湖相沉积形成的风积物,生态系统极为脆弱^[28]。草地退化和沙化后,表土丧失,保水和保肥能力下降,植物难以定植和生长,在风蚀等因素的持续作用下,进一步加剧土壤的沙化。这就是为什么很多沙化草地区域,在围封多年后,植被仍然不见好转的原因。对于这些沙化草地区域,必须通过工程技术手段,固定地表的沙化土壤,打破水土养分的生态约束,推动生态系统越过妨碍其自然恢复的阈值。基于以上生态系统多稳态和韧性的科学基础,我们将草方格技术、草种补播、平茬复壮和合理刈割等技术集成推广,打破沙化土壤对草地恢复的约束,促进生态系统向良性状态的自然演进。

第四,实现草地的可持续管理,必须优化放牧、刈割和人工草地等生产项目的配置,促进生态系统服务的协同提升。必须依据畜牧学、牧草学和草产品加工等科学理论,提高资源利用效率,发展高附加值产业,提升产品利润率,坚持“以地养地”的科学策略,实现以少数自然条件优越区域的高效利用,换来大面积草地的恢复和保护性利用^[29-30],发展适应我国北方风沙区的产业技术体系。具体来说,针对我国北方风沙区乳肉产品的技术问题,依据动物遗传学和动物营养学原理,引进了杜泊羊、西门塔尔牛等国外优质良种,选育了滩羊、巴尔虎羊、乌珠穆沁羊等核心种群,实现了杜蒙杂交等兼顾品质和成本的优秀本地杂交种,进而优化了畜群的遗传资源,提高了肉质,降低了饲养成本,增强了畜产品的市场竞争力。通过人工草地建植技术、裹包青储技术和草颗粒加工技术,实现了牧草的长期保存和营养优化,增加并稳定了饲草料供给,平抑了饲草产量的年际波动,稳定畜牧业生产成本。结合草地生态学知识和现代信息技术,开展季节性轮牧。发展了宁夏滩羊、草原牧鸡为代表的畜牧业绿色食品营销体系,显著提升了产品利润率。基于上述学科知识和技术的应用与研发,实现了“以地养地”的科学目标,保障了生态系统多重服务之间的协同和优化。

2 北方风沙区可持续治理的工程技术实践和恢复效果

2.1 优质牧草补播技术改良及其示范成效

在北方风沙区的恢复工程实践中,发现围栏封育禁牧技术尽管可以促进植被生产力和盖度的自然恢复,但是仍然需要人工补播等适度干预,才能尽快提升和优化群落结构。由于气候干旱,土壤瘠薄,单纯播撒豆科和禾本科牧草种子,种苗成活率低,经济成本高,生产和生态收益甚微。因此,各个示范区依照其自然环境特点,因地制宜地通过补播配合缓释肥,围封和雨季补播联用,沙障和补播联用等技术,提高了天然草地牧草补播的成活率,取得了较好的示范效果。

在更为干旱的北方风沙区西段的四子王旗,通过采取围封保护、雨季补播和补植等措施,充分利用土壤水分含量较高的时间窗口,补播补植抗逆性强的驼绒藜。在四子王旗,补播驼绒藜后的草原植被盖度由2016年19.67%增长到2018年的35%,产量由2016年88.74 g/m²增长到2018年的218.95 g/m²(图2)。驼绒藜群落内部微气候得到了改善,生物多样性稳步提升,天然的多年生优质牧草比例大幅增加。

2.2 人工草地建植技术的优化改良

根据生态位理论、物种间相互补偿作用和植物群落演替理论,在多年实践基础上,研发了“多年生人工草地建植”技术体系,形成了包括牧草品种选择技术、播种技术、田间管理技术和压扁收获技术等一系列技术方

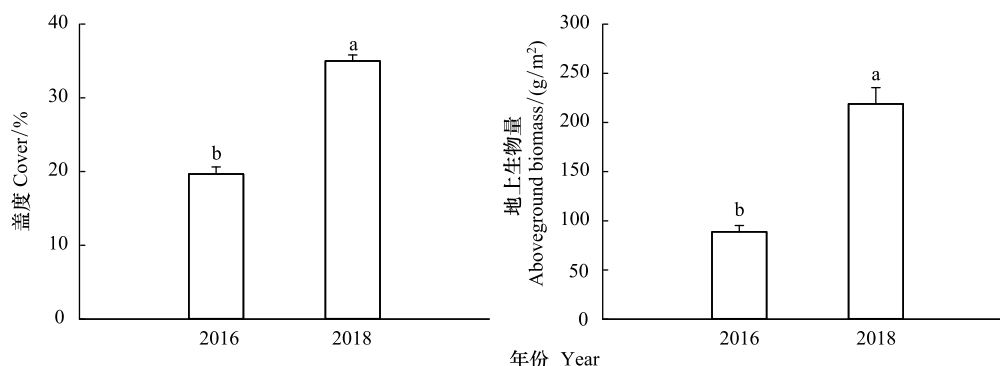


图2 “补植补播”模式对植被盖度和地上生物量的恢复效果

Fig.2 The effects of supplementary seeding on plant community cover and aboveground biomass

法。该技术体系中,多年生牧草的品种选择是核心,主要包括四个组合:长寿命牧草与短寿命牧草的组合,深根系牧草与浅根系牧草的组合,豆科与禾本科牧草的组合,耐旱品种与喜湿品种的组合。

自2015年以来,在锡林郭勒盟多伦县和乌拉盖管理区等退耕地上,选择不同品种的一年生与多年生、豆科与禾本科牧草,采用混播方式建设了多年生人工草地,示范区面积约150公顷。例如,在乌拉盖退耕地上我们分别设置了3个种植方案,包括青苻麦和箭筈豌豆(方案1),青苻麦、垂穗披碱草、无芒雀麦、羊草和敖汉苜蓿(方案2),青谷子、垂穗披碱草、无芒雀麦、羊草和草原3号杂花苜蓿(方案3)。在牧草返青期和快速生长期,结合天气情况进行雨季追肥。适时收获,并采用割草压扁技术,使得牧草茎秆与叶片同步干燥,防止叶片脱落。

通过对3种人工草地建植方案的效果进行对比,发现人工草地播种第一年,方案1产量较高,方案2和方案3中多年生牧草播后第一年出苗晚,植物生长较慢,影响第一年产量。乌拉盖管理区当年天然草地产量为2.7 t/hm²,3个人工草地的每公顷产量达5—12t,是天然草地产量的1.8—4.3倍(图3)。通过计算人工草地成本投入和产出,发现方案1、方案2和方案3的干草生产利润率为85%,55%和4%。这表明多年生混播人工草地能为当地提供大量的优质饲草,实现草地的可持续利用。

在锡林郭勒盟多伦地区,集约化种植青贮玉米和燕麦是更为高效的人工草地建植方案,多品种混播能够显著提高人工草地产量。通过2个种植技术的研究发现,多品种燕麦混播增产55.8%,每公顷干草产量达到12 t左右(图4)。青贮玉米普通种植每公顷产鲜秸秆约75 t,高产种植每公顷产鲜秸秆约105 t,增产36.5%(图5)。

2.3 人工草地和天然草地专用肥研发和应用技术

针对人工草地和天然草地长期利用下养分流失的问题,对氮磷钾等大量元素和硼钼硒等微量元素进行结合,分别设计了适用于人工草地和天然草地的大量营养元素专用肥料和微量营养元素专用肥料。结合各示范区状况,配合划破草皮等处理,开展了研发和应用,取得了理想的示范效果。

在多伦示范区,首先针对燕麦人工草地,开发了燕麦专用肥。研究发现,同时施用氮肥、钾肥和磷肥可以显著增加燕麦产量,其中,N2P2K2和N3P3K3这两组肥料配方组合,对燕麦产量的提升效果最为明显;另外,从经济效益角度分析,施用150 kg/hm²的纯氮、90 kg/hm²的纯磷和45 kg/hm²的纯钾是较为合理的养分用量和配比(图6)。

针对多伦地区的苜蓿人工草地,主要评估了不同微量元素肥料对人工草地产草量的影响。试验发现,施用硼肥对苜蓿产量没有显著影响,但是施用钼肥和施用硒肥显著增加了苜蓿的鲜草与干草产量。从经济效益角度分析,施用81 g/hm²的钼和15 g/hm²的硒是较为合理的钼硒肥用量(图7)。

在位于北方风沙区东部的科尔沁沙地辽宁彰武示范区,重点研发了草地复合肥集成技术并结合了划破草



图3 内蒙古乌拉盖示范区的优质人工牧草种植示范
Fig.3 Artificial pasture construction in Wulagai, Inner Mongolia

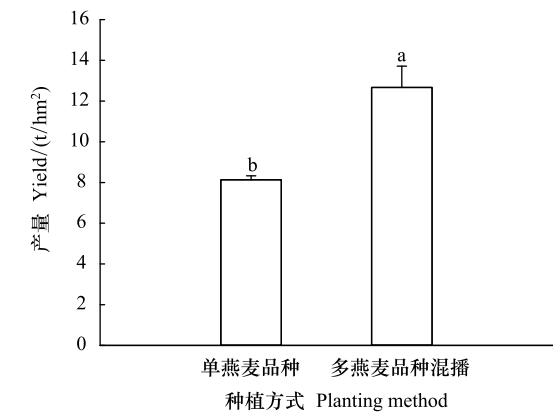


图4 燕麦单品种和多品种混播干草产量比较
Fig.4 Comparison of hay yields of monoculture and mixed oat pastures

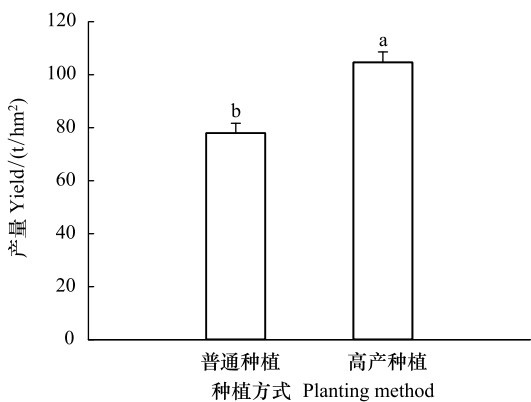


图5 青贮玉米高产种植技术与普通种植鲜草产量比较
Fig.5 Comparison of silage yields in conventional and high-yield maize plots

皮改良措施。草地复合肥由氮磷钾配合微量元素构成。我们在实验小区以 18 cm 的间距进行以 45°角、15 cm 深的人工划破草皮处理。短期试验结果显示,施用缓释肥当年即显著提高了草地地上生产力,表明该方法缓

解了退化草地的养分限制,提高了草地地上生产力(图8);短期划破草皮有促进草地生产力的趋势,由于其可以提高土壤通透性,增加土壤种子库及地表种子的萌发机会,为新生植物的生长提供更多资源,可以预期持续几年的划破草皮处理将有利于促进植物的生长,提高退化草地的生产力。

2.4 运用生态工程方法加速风沙瘠薄地区生态系统恢复

沙障固沙与人工植被恢复措施相结合是当前最常用的沙化草地防治和恢复措施^[31]。该方法主要通过沙化地上设置各种形式的障碍物来控制风蚀,达到防风固沙的目的;另外,通过辅以人工植被恢复技术,加速沙化生态系统的植被重建与恢复,改善植物根际的土壤环境条件,使沙化草地生态系统得到恢复。

通过因地制宜地利用抗逆植物和其它简易材料,我们分别在荒漠草原地区摸索出灌草结合的“四行一带”模式。在水分条件较好的浑善达克沙地摸索出基于不同地形条件下沙地治理的“三分模式”,即“三分之一治理,三分之二封育恢复”。

荒漠草原的“四行一带”模式主要利用灌草结合的

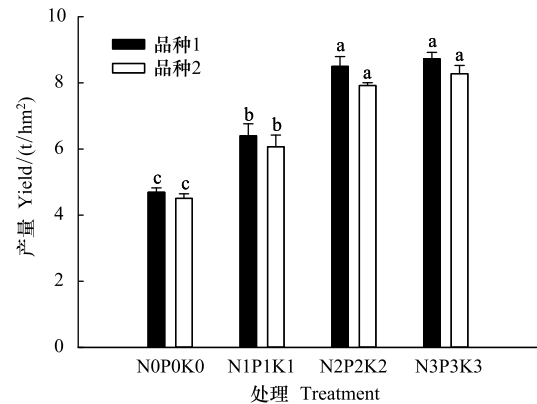


图6 不同养分配比对燕麦产量的影响

Fig.6 Effects of different nutrient treatments on oat yield

品种1:青海444 Qinghai 444; 品种2:加燕 Jiayan; N0P0K0:对照组 Control group; N1P1K1:氮 100 kg/hm² 磷 60 kg/hm² 钾 30 kg/hm² Nitrogen 100 kg/hm² phosphorus 60 kg/hm² potassium 30 kg/hm²; N2P2K2:氮 150 kg/hm² 磷 90 kg/hm² 钾 45 kg/hm² Nitrogen 150 kg/hm² phosphorus 90 kg/hm² potassium 45 kg/hm²; N3P3K3:氮 200 kg/hm² 磷 120 kg/hm² 钾 60 kg/hm² Nitrogen 200 kg/hm² phosphorus 120 kg/hm² potassium 60 kg/hm²

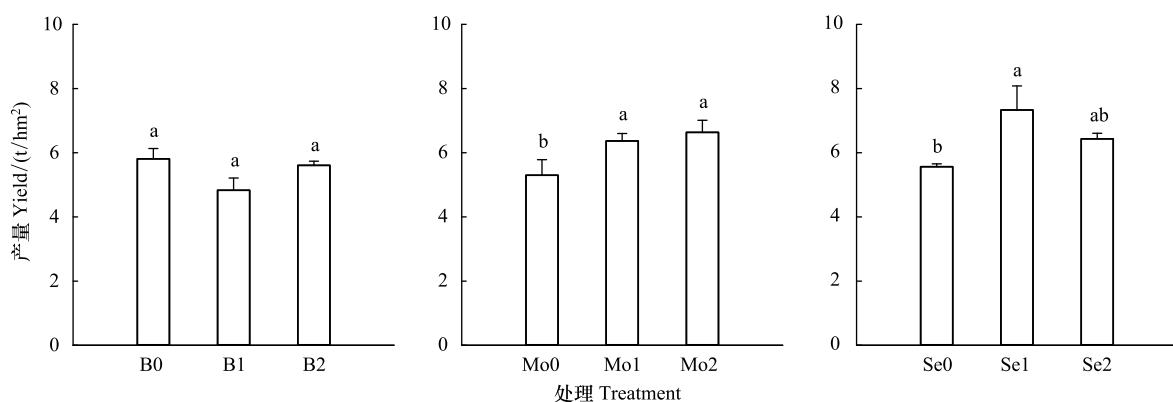


图7 施用不同微量元素肥料对苜蓿产量的影响

Fig.7 Effects of different micronutrients on alfalfa yield

B0:硼酸 0 g/hm² Boron acid 0 g/hm²; B1:硼酸 70 g/hm² Boron acid 70 g/hm²; B2:硼酸 140 g/hm² Boron acid 140 g/hm²; Mo0:钼酸铵 0 g/hm² Ammonium molybdate 0 g/hm²; Mo1:钼酸铵 150 g/hm² Ammonium molybdate 150 g/hm²; Mo2:钼酸铵 300 g/hm² Ammonium molybdate 300 g/hm²; Se0:硒肥 0 g/hm² Selenium fertilizer 0 g/hm²; Se1:硒肥 15 g/hm² Selenium fertilizer 15 g/hm²; Se2:硒肥 30 g/hm² Selenium fertilizer 30 g/hm²

草地建植方法(华北驼绒藜+蒙古冰草),通过在大面积天然退化草地、撂荒地或开垦矿区间隔种植灌木和草本植物,形成灌木带与草本植物间隔的布局,借助植株高大的灌木带降低近地面风速和土壤风蚀量,聚雪保墒、保持水土,有效促进了群落内草本植物生长与分蘖,快速提高干旱半干旱区的植被覆盖度和生物量。2016年以来,基于灌草结合“四行一带”模式,我们在北方风沙区西部的四子王旗荒漠草原区进行了大范围草地修复示范。

在操作上,首先对退化草地进行开沟平整,沟深 0.2—0.25 m,沟宽 0.4—0.5 m,春季或秋季移栽华北驼绒藜根苗四行成一带,垂直于风向间隔种植。四行成一带的带宽为 3 m,带间距 6 m(根据免耕补播机的宽度<6 m 而定),采用免耕补播机播种的方式,在带间雨后补播种植草本植物冰草。冰草条播行距 25—30 cm,免耕播深 1—1.5 cm,之后重复上述两种植物依次种植。建植第二年,行内华北驼绒藜实生苗迅速繁殖,覆盖地表,带间旱作条件下补播种植的冰草保苗率达到 60%,灌木移栽后隔 3 年进行一次平茬,平茬高度控制在 6—7 cm,补播种植的草本植物为多年生植物,使其自然生长每年刈割一次即可。该技术应用以来,治理效果十分显著。四子王旗退化草地示范区的草产量比对照草地可提高 20—30%,植被盖度达到 30% 以上。

灌草结合“四行一带”模式一次性建植,多年受益,在粗放管理条件下,可提高天然草场植被盖度,为后续生物多样性的增加、饲草品质的改善和生物量的提高构

建了良好的生态生物环境,其潜在生态效益不可估量。从经济成本和产出角度看,该模式建设投资成本主要为第一年驼绒藜及牧草种植及种苗费用,每公顷驼绒藜“四行一带”投入成本 5000 元,每公顷补植补播驼绒藜生态应用投入成本 4500 元,但是第三年每公顷驼绒藜生态应用田干草产量可达 2.25 t,按照单价 1200 元/t,每公顷产值可达 2700 元。因此,在第三年之后,“四行一带”模式可以逐渐获得经济效益。

浑善达克地区退化草地修复的“三分模式”是指在基于实地调查的基础上,针对浑善达克沙地地区总面积的 1/3,且无植被覆盖的流动沙丘、半固定沙丘和风蚀坑采取人为干预措施进行治理,对约占沙地总面积 2/3,且仍保存一定数量植物种子库的固定沙丘、丘间平地 and 丘间低地,通过围封和休牧的方式,保护新生的植物幼苗,充分利用自然力量使植被逐渐恢复。

在工程技术上,对于固定沙丘、丘间平地 and 低地主要进行围封与休牧,依靠土壤种子库中的植物种子和现存植被的自我繁殖和更新能力,逐步实现植被的恢复;对于风蚀坑、流动沙丘 and 退化草地等采用工程措施进行土地平整后,再通过播种小麦、扦插黄柳、柠条等措施建立生物或非生物网格,并在网格内播种沙蒿、沙生冰草、扁蓿豆等固沙先锋植物。在生物网格的保护下,网格内先锋植物实现定居后,逐步促进植被的恢复。

2015 年以来,基于“三分模式”治理的技术体系,通过技术拓展,与地方政府和企业合作,在锡林郭勒盟的乌拉盖管理区,针对不同地形条件(风蚀坑、陡坡、缓坡和平地)下的退化草地,对退化区域采用了不同的治理措施。首先对风蚀坑沙地,采用机械进行沙地平整,之后采用物理沙障+生物沙障+人工补播草种+枯草铺设的生态修复方法进行治理。例如,将芦苇做成 2 m×2 m 的菱形网格铺设于沙地中央的严重风蚀区域用于固定地表沙壤,利用一年生牧草建植速度快的优势,在沙障内采用一年生草本牧草种子进行十字条播,进一步加速沙障内风沙的固定。在沙障的其他区域混播一年生和多年生、豆科和禾本科牧草种子,促进植被的恢复。在陡坡区域用芦苇帘铺于沙地上方,用竹签固定芦苇帘于沙地上,再进行多种牧草的混播,在风蚀剧烈的陡坡处,可以使用尼龙网或铁丝网进一步固定芦苇帘,减少风蚀对土壤和植被的破坏。对于缓坡区沙地采用生物沙障+人工补播草种+苇帘铺设的方式进行修复。利用黄柳、羊柴和沙蒿等灌木和半灌木进行条播形成生物沙障,在沙障间混播人工草种,并将芦苇帘用竹签固定于沙地上方,起到防风作用。对于退化沙地的平坦区,主要采用围封禁牧的方式进行修复。经过四年多的治理,至 2018 年,植被群落高度平均增幅 130%,盖度平均增幅 160%,植株密度平均增幅 225%,治理效果十分显著^[32-33](图 9)。植被群落由一年生植物(先锋植物,狗

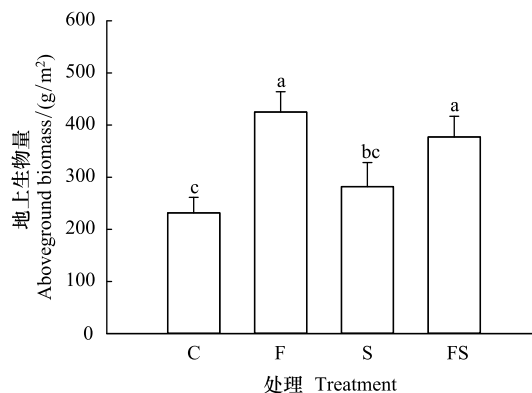


图 8 蒙辽地区施用缓释复合肥(F),划破草皮(S)以及缓释肥和划破草皮集成(SF)等技术的地上生物量 and 对照组(C)的比较

Fig.8 Comparison of aboveground biomass with control group (C), using slow-release compound fertilizer (F), sward ripping (S) and sward ripping and slow-release fertilizer integration (SF) in Inner Mongolia-Liaoning area

尾草和虫实)占优势(植被盖度 65%)演替为多年生的豆科植物和禾本科植物占优势(植被盖度 60%),群落趋于成熟(图 10)。

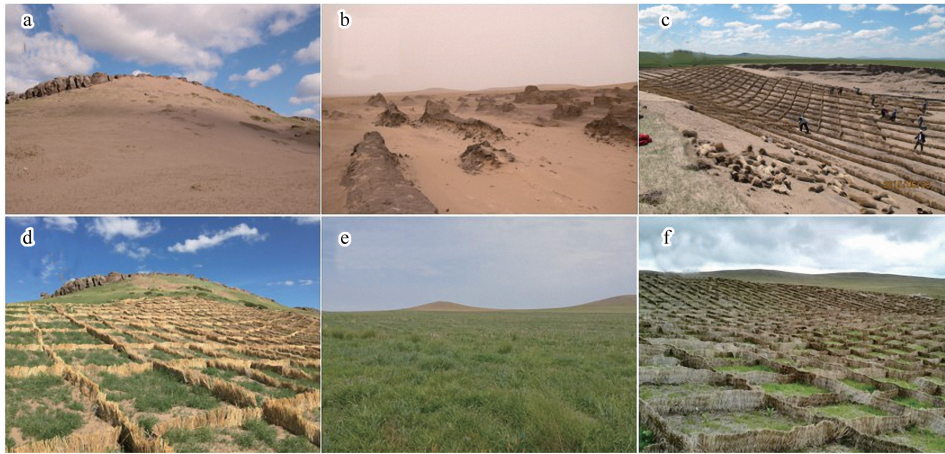


图 9 不同地形条件下沙化草地治理前后对比

Fig.9 Fixation of mobile sand under different topographical conditions—comparison between pre-treatment in 2015 a、b、c 为 2015 年治理前的植被,d、e、f 为治理后 2017 年的植被

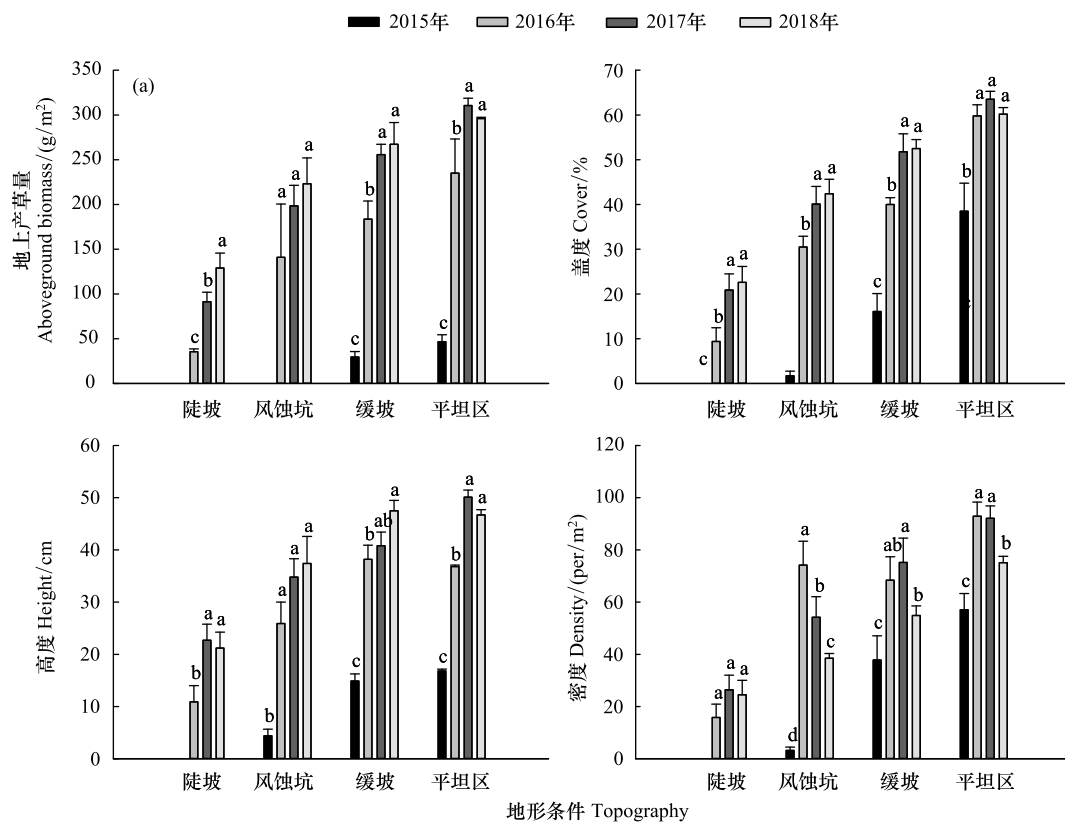


图 10 2015—2018 年不同地形条件下沙化草地治理前后的对比(图片重绘自陈翔,2019^[33])

Fig.10 Changes of plant community characteristics in desertified grasslands under different topographical conditions from 2015-2018 (Redraw from Chen et al., 2019^[33])

沙化草地修复的“三分模式”具有显著的生态效益和生产效益。根据乌拉盖管理区沙化草地的治理成本

核算,每公顷沙地治理的材料费约为 2295 元,包括芦苇、牧草种子、覆沙网等,人工费约为 1650 元/公顷,总计成本约为 3945 元/公顷。经过 2—3 年的修复,草地的生产力增加 80—160 g/m²。如果按照牧草干重 1.0—1.5 元/千克计,则 2—3 年能实现投资回收。自 2015 年以来,本模式陆续在锡林郭勒盟乌拉盖管理区、西乌珠穆沁旗等进行了该技术模式的大面积应用,累计推广面积 2 万余亩,有效解决了部分地区因过度放牧、建设开采等活动带来的草地沙化问题,为我国北方风沙区中部地区开展退化沙化草地治理提供了示范模式。

2.5 草牧产业协调提升的绿色生态产业体系

在北方风沙区,我们通过畜产品良种选育、草产品加工、绿色产品认证等技术和商业手段,提高畜产品的品质,降低饲养成本,增加本区域农牧民的产品竞争力,促进盈利增收,抚平本区域农牧业生产和生态保育之间的矛盾,促进了生态系统服务之间的协同和平衡。例如,我们协助牧民对滩羊、乌珠穆沁羊、巴尔虎羊的核心群进行了选育复壮,引入了杜泊羊、西门塔尔牛等良种,示范了同期发情、配套移植、杂交等现代畜牧业管理技术,实现了良种快速扩繁,并且提升其对本地艰苦环境的适应能力,配合地方政府实现减羊增牛结构调整,取得了较好的经济效益。我们还利用青储菌剂,将玉米、甜高粱、天然牧草、柠条等饲草进行处理,优化了畜群的饲喂配方,降低了饲养成本,改善了肉质。本项目协调其它项目,协助企业和地方政府创立和发展了“滩羊”、“草原牧鸡”等绿色食品品牌,获得了良好的经济效益,实现了少部分草地高效利用,进而保障了大面积草地的恢复。

3 在北方风沙区实现可持续发展目标的科学技术途径

当前,在中国实施的生态文明建设和联合国可持续发展目标高度契合,确立了实现经济发展、社会进步和环境改善三位一体的可持续发展观^[8,34]。现阶段的北方风沙区治理经验,已经为实现第 15 个目标,即“保护、恢复和促进可持续利用陆地生态系统,可持续地管理森林,防治荒漠化,制止和扭转土地退化,提高生物多样性”提供了坚实的科学依据和生态工程技术基础^[34]。然而,为了进一步实现“生态-社会-经济”三者之间的协同增长,我们认为今后的北方风沙区治理,要拓展现有的科学理论认知,理解自然—社会系统互馈与耦合;将“水、土、气、生”为主要研究内容的恢复生态学理论发展和经济增长、人类福祉提升等经济社会要素结合在一起;既要考虑区域内生态问题所面临的地理空间和自然资源导致的复杂约束,又要把经济全球化和气候变化等域外影响纳入考虑范围。在认识得到进一步拓展的基础上,我们将重新审视和发展目前执行的生态恢复技术体系,引入现代生命科学、能源科学、材料科学、数据和计算科学及人工智能等前沿高技术理论,并与互联网市场、生态补偿政策和绿色金融工具、国家生态红线政策相结合,发展出下一代的风沙区治理技术体系。我们相信,今后的北方风沙区治理可以实现“绿水青山就是金山银山”这个可持续发展目标。

参考文献 (References):

- [1] Wu J G, Zhang Q, Li A, Liang C Z. Historical landscape dynamics of Inner Mongolia: patterns, drivers, and impacts. *Landscape Ecology*, 2015, 30(9): 1579-1598.
- [2] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, Sun X F, Connor J D, Crossman N D, Stafford-Smith M, Wu J G, He C Y, Yu D Y, Liu Z F, Li A, Huang Q X, Ren H, Deng X Z, Zheng H, Niu J M, Han G D, Hou X Y. China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204.
- [3] Jiang G M, Han X G, Wu J G. Restoration and management of the Inner Mongolia grassland require a sustainable strategy. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2006, 35(5): 269-270.
- [4] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, Tam C, Chen X D. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- [5] Liu M, Huang J K, Dries L, Heijman W, Zhu X Q. How does land tenure reform impact upon pastoral livestock production? An empirical study for Inner Mongolia, China. *China Economic Review*, 2017, doi: 10.1016/j.chieco.2017.09.009.
- [6] Piao S L, Yin G D, Tan J G, Cheng L, Huang M T, Li Y, Liu R G, Mao J F, Myneni R B, Peng S S, Poulter B, Shi X Y, Xiao Z Q, Zeng N, Zeng Z Z, Wang Y P. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [7] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2):

- 122-129.
- [8] 傅伯杰. 面向全球可持续发展的地理学. 科技导报, 2018, 36(2): 1-1.
- [9] Li Y H, Wang W, Liu Z L, Jiang S. Grazing gradient versus restoration succession of *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. Grassland in Inner Mongolia. Restoration Ecology, 2008, 16(4): 572-583.
- [10] Wan H W, Bai Y F, Hooper D U, Schönbach P, Gierus M, Schiborra A, Taube F. Selective grazing and seasonal precipitation play key roles in shaping plant community structure of semi-arid grasslands. Landscape Ecology, 2015, 30(9): 1767-1782.
- [11] Hoffmann C, Giese M, Dickhoefer U, Wan H W, Bai Y F, Steffens M, Liu C Y, Butterbach-Bahl K, Han X G. Effects of grazing and climate variability on grassland ecosystem functions in Inner Mongolia: Synthesis of a 6-year grazing experiment. Journal of Arid Environments, 2016, 135: 50-63.
- [12] Wang D L, Du J, Zhang B T, Ba L, Hodgkinson K C. Grazing intensity and phenotypic plasticity in the clonal grass *Leymus chinensis*. Rangeland Ecology & Management, 2017, 70(6): 740-747.
- [13] Kemp D R, Han G D, Hou X Y, Michalk D L, Hou F J, Wu J P, Zhang Y J. 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.
- [14] 丁海君, 韩国栋, 王忠武, 王春霞, 张睿洋, 胡吉亚. 短花针茅荒漠草原不同载畜率对植物群落特征的影响. 中国草地学报, 2014, 36(2): 55-60.
- [15] Xiong D P, Shi P L, Zhang X Z, Zou C B. Effects of grazing exclusion on carbon sequestration and plant diversity in grasslands of China—A meta-analysis. Ecological Engineering, 2016, 94: 647-655.
- [16] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云. 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 2016, 61(2): 139-154.
- [17] Frank H K, Frishkoff L O, Mendenhall C D, Daily G C, Hadly E A. Phylogeny, traits, and biodiversity of a Neotropical bat assemblage: Close relatives show similar responses to local deforestation. The American Naturalist, 2017, 190(2): 200-212.
- [18] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.
- [19] 潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩. 中国北方草原退化现状与恢复技术. 科学通报, 2018, 63(17): 1642-1650.
- [20] 张新时, 唐海萍, 董孝斌, 李波, 黄永梅, 龚吉蕊. 中国草原的困境及其转型. 科学通报, 2016, 61(2): 165-177.
- [21] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. Nature, 2004, 431(7005): 181-184.
- [22] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, Naeem S, Pan Q M, Huang J H, Zhang L X, Han X G. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from inner Mongolia Grasslands. Global Change Biology, 2010, 16(1): 358-372.
- [23] Hillebrand H, Gruner D S, Borer E T, Bracken M E S, Cleland E E, Elser J J, Harpole W S, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Consumer versus resource control of producer diversity depends on ecosystem type and producer community structure. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(26): 10904-10909.
- [24] Lan Z C, Bai Y F. Testing mechanisms of N-enrichment-induced species loss in a semiarid Inner Mongolia grassland: critical thresholds and implications for long-term ecosystem responses. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2012, 367(1606): 3125-3134.
- [25] Cingolani A M, Noy-Meir I, Díaz S. Grazing effects on rangeland diversity: a synthesis of contemporary models. Ecological Applications, 2005, 15(2): 757-773.
- [26] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [27] Folke C, Carpenter S, Walker B, Scheffer M, Elmqvist T, Gunderson L, Holling C S. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35: 557-581.
- [28] 汪久文, 蔡蔚祺. 锡林河流域土壤的发生类型及其性质的研究. 草原生态系统研究(第三集). 北京: 科学出版社, 1988: 23-83.
- [29] 方精云, 潘庆民, 高树琴, 景海春, 张文浩. “以小保大”原理: 用小面积人工草地建设换取大面积天然草地的保护与修复. 草业科学, 2016, 33(10): 1913-1916.
- [30] 蒋高明, 吴光磊, 程达, 郑延海, 刘美珍, 李彩虹. 生态草业的特色产业体系与设计: 以正蓝旗为例. 科学通报, 2016, 61(2): 224-230.
- [31] 赵燕兰, 周青平, 曾鹏, 戴龙昊, 彭云煦, 柏松. 沙化草地植被恢复治理技术研究综述. 草原与草业, 2017, 29(3): 7-11.
- [32] 刘亚玲, 邢旗, 王瑞珍, 陈翔, 闫晓红, 张健, 包乌云, 程磊. 锡林郭勒草原生态修复技术体系探讨. 草原与草业, 2018, 30(4): 13-19.
- [33] 陈翔, 邢旗, 张健, 闫晓红, 刘亚玲, 包乌云, 王瑞珍, 张春良, 阿拉腾苏和. 乌拉盖沙化草原治理技术与效果监测. 草原与草业, 2019, 31(1): 20-25.
- [34] United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. (2015-09-25). <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.