退化草原植被免耕补播修复理论与实践

张英俊^{1*}, 周冀琼^{1,2}, 杨高文³, 荆晶莹¹, 刘楠¹

1. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193;

2. 四川农业大学动物科技学院, 成都 611130;

3. Institut für Biologie, Freie Universität Berlin, Berlin 14195, Germany

* 联系人, E-mail: zhangyj@cau.edu.cn

2020-03-03 收稿, 2020-04-03 修回, 2020-04-03 接受, 2020-04-07 网络版发表

国家自然科学基金(31830092)和国家牧草产业技术体系(CARS-34)资助

摘要 退化草原植被修复是当前我国草原生态治理最紧迫的任务, 免耕补播是退化草原植被修复关键技术, 其意义是在不破坏或少破坏草原植被的条件下, 通过补播适宜的优良草种, 提高退化草原生产力和物种多样性。该技术与其他补播改良方式的不同之处在于免耕, 难点也在于如何在不扰动或少扰动原生植被的前提下成功补播修复草原, 其关键技术主要包括补播物种的选择、补播技术和补播后草原管理。本文针对上述技术难点, 提出补播物种选择假说、免耕补播的空斑原则和补播后亚顶级群落管理模型, 根据《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》国家标准, 制定了针对不同退化程度草原的免耕补播技术方案; 依据全国草原气候和土壤等条件, 提出了全国草原实施免耕补播修复的规划, 对我国草原生态文明建设具有重大意义。

关键词 草原植被, 修复, 免耕补播, 生产力, 物种多样性

我国草原约4亿公顷, 占国土面积40.7%, 是最大的陆地生态系统和最重要的绿色生态屏障, 也是广大农牧民基本生产生活资料的重要依托^[1,2]。目前我国草原约90%以上仍有不同程度的退化, 导致草原生态服务功能急剧降低, 表现为生产力下降、生物多样性减少、毒杂草增多、土壤侵蚀严重、生物灾害和自然灾害频发等^[3,4]。加强草原保护与利用事关国家乡村振兴战略的实施和生态文明建设大局。自2000年以来, 国家实施的一系列天然草原保护、退牧还草、草原生态保护奖励机制等工程项目, 有效促进了全国草原的保护与建设, 我国草原综合植被盖度由2011年的51.0%增加到2017年的55.3%^[5]。

我国退化草原治理的措施主要以围栏封育自我恢复和鼠虫害防控为主, 但这些措施往往恢复周期长、实施效果不稳定。据监测, 全国草原退化问题依然严

重, 自20世纪80年代开始草原生物灾害防治以来, 目前全国草原鼠虫害面积仍然高达9亿多亩, 草原毒害杂草面积高达10亿亩^[5]。这些生物灾害在中重度退化草原区频繁发生, 均与过度放牧造成的草原生产力和草场质量下降有关^[6]。补播改良是退化草原修复的重要措施, 是在退化草地土壤中播种一些适应性强、营养价值高的优良植物物种, 增加草原植被覆盖度、物种多样性, 从而提升草原生产力并提高草场质量^[7]。然而, 由于补播牧草品种选择不当, 补播草种在免耕环境下易受到原生植被的竞争排除, 加上补播技术和补播改良后草地后续管理不到位等诸多原因, 导致免耕补播物种成活率低、补播草地利用年限短、草地群落稳定性差、补播改良成本高、比较效益低等问题^[8-10]。因此, 以往的实践中对轻中度退化草原基本不执行补播改良, 对重度退化草原实施以深耕翻或浅耕翻进行补播改良。

引用格式: 张英俊, 周冀琼, 杨高文, 等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践. 科学通报, 2020, 65: 1546–1555

Zhang Y J, Zhou J Q, Yang G W, et al. Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1546–1555, doi: [10.1360/TB-2020-0224](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0224)

因深耕翻或浅耕翻对原生植被进行了破坏或去除,虽然可减轻本土植物对补播物种的竞争排除,补播效果一般也优于免耕补播^[11~13],但是耕翻补播因破坏了原生植被且对土壤扰动大,不利于草原土壤碳储藏^[14]。此外,如果补播时间和技术掌握不恰当,极易造成水土流失,不利于草原生态系统功能的恢复,存在破坏草原的风险,因此在推广应用上受到限制。

免耕补播与耕翻补播不同之处在于对原生植被破坏小甚至不破坏,草原土壤基本无翻垡,也可以快速改良草原植被组成。因此免耕补播不仅能够迅速提高草原生产力和物种多样性,还可以防止水土流失、提高草原碳汇功能^[14]、减少草原生物灾害的发生。免耕补播包括机械补播和飞机播种(飞播),飞播成功的关键在于飞播立地条件、飞播种子的组合和特殊处理以及飞播技术等^[15]。过去10多年,我们主要对机械补播进行了研究,初步筛选了退化草原免耕补播优良草种,研究了补播草种及其种苗生长与原生植被关系,逐渐阐明了退化草地空斑对不同类型草种成活的影响机制,突破了补播后土壤水分散失及原生植物对补播种苗生长影响的技术瓶颈,极大地提高了免耕补播种苗的成活率。结合已有的改良草地合理利用技术,提出了退化草原植被免耕补播修复的理论,包括补播物种选择假说、免耕补播的空斑原则和补播后亚顶级群落的管理模型,并据此制定了技术方案,为全国退化草原植被生态修复提供理论和技术支撑。

1 退化草原免耕补播修复理论

1.1 补播物种选择假说:退化草原土壤对免耕补播植物具中性或正反馈作用

现有研究发现,退化草原补播乡土植物更容易获得建植成功,补播不仅缩短了草原自然恢复进程,在提高草原生产力的同时,也促进植物群落结构改善,可快速恢复草原生态系统的多功能性和稳定性^[16,17],但乡土植物种子难以收获,因此在大面积补播时受到限制。另外,在植物-土壤反馈作用(plant-soil feedbacks, PSF)的研究中发现,一些乡土植物因存在植物-土壤负反馈而难以在草原成功定植^[18,19]。因免耕补播修复技术采取对土壤少扰动无翻垡措施,因此退化草原补播时需要考虑植物-土壤反馈作用。根据植物-土壤反馈作用的原理,补播草地植物在生长过程中通过根系或凋落物输入,改变土壤的生物或非生物环境最终影响后续

或补播植物的生长^[19]。植物-土壤反馈作用存在于植物群落演替进程的各个阶段,退化草原植被通常表现为逆向演替或倒退演替,演替后期物种因对前期土壤中病原菌的较强耐受力,其土壤反馈作用一般为正反馈^[20]。据此,我们提出补播物种选择假说,即退化草原补播物种无论是乡土种还是引进种,必须选择具有中性或正植物-土壤反馈特征的物种,同时补播物种应具有发达根系,能利用根系分泌物或凋落物“主场优势”迅速改变原生植被的土壤环境或微生物区系,这样的补播物种才能够在退化草原土壤中成功建植。

草原80%以上的植物都与土壤中的有益微生物丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)形成共生体,而菌根真菌是植物-土壤反馈作用的重要驱动因子^[21]。利用隔室分离法研究典型草原乡土植物建立的菌丝网络对补播幼苗的生长影响,证明群落中建群种克氏针茅(*Stipa krylovii*)或羊草(*Leymus chinensis*)建立的AMF菌丝网络显著抑制了伴生种冰草(*Agropyron cristatum*)幼苗的生长;而冰草和退化指示种冷蒿(*Artemisia frigida*)建立的菌丝网络则显著抑制了羊草幼苗的生长,但对克氏针茅没有影响;冷蒿、羊草和克氏针茅建植的菌丝网络均促进冷蒿幼苗生长(图1)^[22]。该结果佐证了补播物种选择假说,补播乡土植物也需要进行筛选,同时表明通过植物在土壤中形成的菌丝网络影响后续植物生长是植物-土壤反馈作用的重要机制之一。

选择的补播物种应具发达根系,在野生环境中能有效地与原生植被竞争养分、水分等生长所需的资源,或通过根系分泌物影响土壤微生物区系,能与土壤中的AMF或其他有益微生物如根瘤菌等形成共生体。以本课题组研究结果为例,在退化羊草草原上补播黄花苜蓿(*Medicago falcata*)的根系分泌化学物质(如5-甲基十三烷、正三十五烷等)能够抗有害真菌,提高土壤溶磷细菌含量,促进补播植物磷素吸收,对植物群落的生产力及多样性产生正向调节作用^[23],因此可选择黄花苜蓿作为该退化草原类型的补播物种。美国和加拿大对退化草原补播豆科植物,不仅改善了草原植物群落结构及其多样性,而且由于豆科植物通过共生根瘤菌固氮,增加了草原土壤氮素营养^[24,25],对草原植被恢复起了正反馈调节作用。

补播物种的凋落物降解应具备“主场优势”,并能短时间形成特异性土壤微生物群落。凋落物介导的PSF和微生物介导的(含AMF)PSF相互作用并有协同效应。研

图1 乡土植物种类对克氏针茅(a)、冷蒿(b)、羊草(c)和冰草(d)幼苗菌根生长反应的影响。*表示接种AMF对幼苗地上生物量有显著影响 ($P < 0.05$); NS表示接种AMF无显著影响; 不同的大写字母表示不同成株处理间有显著差异^[22]

Figure 1 Effects of the native adult plants identity on mycorrhizal growth response (MRG) of the seedlings of *S. krylovii* (a), *A. frigida* (b), *L. chinensis* (c) and *A. cristatum* (d). Sterisks indicate the significant effect ($P < 0.05$) of AMF inoculation on the shoot biomass of seedlings; NS indicates that no significant effect was detected between AMF inoculation and non-AMF inoculation treatments; bar groups with different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among adult plant treatments^[22]

究表明, 当病原菌存在时, 凋落物分解不是PSF主导因素, 但随着土壤AMF丰度的增加凋落物分解变得重要, 原因是AMF促进凋落物向贫瘠土壤释放养分, 导致土壤营养和AMF同时增加, 产生正向影响^[26,27]。因此, 补播植物的凋落物降解在退化草原土壤中形成“主场优势”, 即凋落物的分解速率在其作为优势种群落中高于非优势种群落, 从而促进养分循环与释放以及对土壤微生物群落的“塑造”, 最终对补播植物生长产生正反馈。

1.2 免耕补播空斑原则: 补播豆科植物需小光空斑、禾本科植物需大光空斑和根空斑

20世纪70年代, 空斑概念被引入草原生态学研究^[28], 草原植物依靠营养繁殖和种子繁殖两种方式进行更新, 但植被更新、种子萌发、种苗建植都需要一些空斑才能成功实现^[29-32], 因此草原上一定密度的空斑对维持草原群落多样性具有重要意义^[33]。根据地上地下竞争机制的不同, 空斑分为光空斑(light gap)和根空斑(soil gap)。光空斑是指植物间因缺乏地上植被覆盖而降低植物对光照竞争的一种地面空斑; 根空斑是指一定区域内土壤中因缺少植物根系而减轻对水分和养分竞争压力的地上地下裸斑(图2)^[34]。

草原退化导致植被稀疏和高空斑率, 不同的放牧利用强度会形成大小不一的空斑, 中轻度放牧利用下的草地多形成直径3~10 cm的小空斑, 而重度利用下的草地中直径 ≥ 10 cm的大空斑分布居多^[35-37]。免耕补播是在对原生植物少破坏前提下, 利用退化形成的空斑或播种机开沟器创造的空斑, 将补播植物定植成功。考虑补播草原的综合效益, 具有生态适应性广和饲用价值高的豆科或禾本科植物通常被选为补播物种。空斑解决了原生植被相邻物种对补播植物的竞争排除问题, 通过适当的空斑扰动为补播物种定植提供了空间, 为成功补播创造了条件。空斑补播植物的种苗成活呈“禾

图2 (网络版彩色)空斑类型^[34]
Figure 2 (Color online) Gap type^[34]

大豆小”特点,即补播禾本科植物需要大光空斑,补播豆科植物需要小光空斑。根空斑显著影响禾本科植物的定植,但对豆科植物定植影响不显著(图3)^[38,39],我们将这一现象定义为免耕补播的空斑原则。

通过在内蒙古呼伦贝尔地区模拟不同退化草原形成的空斑研究,发现轻度退化草原形成的直径小于10 cm小光空斑可显著提高补播豆科植物的出苗存活率、生物量、根瘤体积以及固氮酶的活性,其机制是小光空斑提供了有利于豆科植物生长和共生根瘤菌所需的光照强度和土壤水分;而中度及重度退化草原形成的直径大于20 cm的大光空斑更适合补播禾本科植物的出苗和建植,主要是由于大空斑中比较高的土壤温差促进禾本科植物种子打破休眠并快速出苗。除此之外,根空斑减轻了乡土植物和补播禾本科植物之间的地下竞争,促进了补播禾本科植物的生长^[38,39]。

另一方面,空斑通过影响草原土壤养分,从而影响补播植物生长。没有空斑的对照和小于10 cm小空斑的土壤有效磷和全氮含量显著高于20 cm的大空斑,而小于10 cm小空斑土壤硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)含量显著高于没有空斑的对照。大空斑增加了植物可吸收光照辐射和土壤温度,但是造成空斑表层土壤水分减少,致使土壤盐基离子与土壤中阴离子(如硝酸根(NO_3^-)或磷酸根(PO_4^{3-})离子)发生中和反应,降低空斑表层土壤养分含量^[33];同时大光空斑和根空斑也减少了凋落物与根系向土壤的输入,导致土壤全氮和全碳含量下降^[38]。

1.3 草原补播后亚顶级群落的管理模型

植被恢复的重要措施就是补播草原演替后期亚顶级甚至顶级群落中的物种或相似种^[40,41],因此,通过免耕补播修复的草原植被,不仅可以提高草原群落多样

性^[42],理论上应该达到群落亚顶级状态或发生偏途演替状态。这符合Clements^[43]提出的演替顶级理论及后期Stringham等人^[44]提出的静态-过渡态或多稳态模型。植被处于亚顶级状态或维持偏途演替是同时获得高生产力和高物种多样性的关键,对于我国欧亚草原,其生产力与多样性的关系一般呈线性正相关^[45],重度利用显著降低了草地的生产力和群落物种多样性,且群落物种多样性的降幅要大于生产力的降幅^[42],而适度放牧和割草均有利于草原物种多样性的保持,因此也可以维持高生产力。据此,我们建立了我国退化草地植被免耕补播修复后草地利用管理模型(图4)。研究证明草地适度利用可通过留茬高度来进行管理,适度放牧规定当植株高度达20~30 cm时开始放牧,留茬5~8 cm时停止放牧;适度割草收获一般规定当植物高度达50~60 cm时刈割,留茬8~10 cm^[46]。适度放牧或割草利用可减小草原原生植被的竞争,促进补播植物的生长和在群落中的维持^[47,48];同时,由于补播植物对退化草原土壤的反馈作用属于中性或正反馈,因此必须通过放牧或割草管理来控制补播物种的生长,从而维持草原群落多样性。

放牧和割草利用减轻植被对光照的竞争,阻止一个或少数种在群落中的竞争优势,从而影响物种多样性^[49];同时放牧利用还可通过稳定均匀性来维持草原植物多样性^[50],这符合中度干扰假说,即中度放牧不仅因植物补偿或超补偿生长而获得高生产力,而且能够实现物种多样性的最大化^[51,52]。对在呼伦贝尔草甸草原研究表明,在天然草原补播苜蓿并添加磷肥,可提高15%~34%的草原生产力并极大改善草原牧草品质,割草可保持苜蓿在植被中的比例和群落物种多样性。同时,割草也增加了补播草原土壤中的碳氮储量,提高了

图3 空斑大小及类型对种苗建植的影响。(a) 豆科黄花苜蓿; (b) 禾本科无芒雀麦^[38,39]

Figure 3 Seedling survivorship in undisturbed controls (CK) and different-sized and type vegetation gaps. (a) *Medicago falcata*; (b) *Bromus inermis*^[38,39]

图4 (网络版彩色) 草原补播后亚顶级群落的管理模型
Figure 4 (Color online) Reseeded grassland subclimax management model

细菌/真菌比, 改变了土壤微生物的群落结构, 促进草原生态功能的稳定和可持续^[53].

2 退化草原植被免耕补播修复实践

水分是我国北方草原第一性限制因素^[1,8], 防止补播草种在播种后因缺水而无法成活是草原补播能否成功的关键, 因此, 我国退化草原植被免耕补播修复适用于水分条件较好的湿润或半湿润草原. 为了防止补播后土壤水分散失影响种苗成活, 我们研制了倒“T”型开沟器, 可显著降低补播后土壤水分散失, 同时还可防止

原生植被地上凋落物等对补播种苗生长的化感限制^[54]. 退化草原植被免耕补播修复技术框架模型如图5. 选择与退化草原土壤呈中性或正反馈作用的补播草种, 根据退化等级和当地降雨情况选择不同的补播技术, 补播后的草地管理以留茬高度为指标进行中度利用管理. 其具体技术方案包括补播草种的选择、补播机械、补播技术和播后管理与利用.

2.1 补播草种选择

补播草种的选择首先考虑生态适应性, 根据不同草原类型的地理分布及自然条件(水热条件及土壤环境)进行选择, 其次应选择对退化草原土壤的反馈作用呈中性或正反馈的营养价值高的优质豆科或禾本科植物, 通常以该植被演替的顶级或亚顶级群落的优势植物和次优势植物或与其相似种为最佳草种. 我国各类型草原在生态适应性满足的情况下, 都可以选择免耕补播豆科植物, 一般在补播前应对豆科植物进行根瘤菌接种.

2.2 补播机械

补播机械可使用专用的牧草免耕播种机^[55], 具有开沟、施肥、补播、覆土、镇压为一体的功能. 补播机械需配置“V”型(即双圆盘)和倒“T”型开沟器. “V”型开沟器宽度一般 ≤ 5 cm, 倒“T”型开沟器宽度为5~10 cm. “V”型开沟器可在土壤中制造小空斑, 适合作

图5 (网络版彩色) 退化草原植被免耕补播修复框架模型. 图中单子叶植物代表禾本科, 双子叶植物代表豆科; PSF+代表植物土壤反馈作用为中性反馈和正反馈; 罗马数字编号II~IV代表轻度、中度、重度退化等级; 向下箭头代表补播机倒“T”型开沟器; “V”代表补播机双圆盘开沟器; 利用强度指割草或放牧利用的强度

Figure 5 (Color online) No-tillage reseeded technology model for degraded grassland restoration. Monocots indicates gramineous plants; dicotyledon indicates leguminous plants; PSF+ indicates positive or neutral effect of plant-soil feedback; II~IV indicates light, moderate and strong & extreme degradation; the down arrow indicates “T” slot opener; “V” indicates “V” slot opener; Utilization intensity means grazing or cutting rate

业于降雨量 ≥ 400 mm/a的中轻度退化草原的豆科植物补播或重度退化草原的禾本科植物补播;对于降雨量 <400 mm/a退化草原,无论禾本科还是豆科植物,均应使用倒“T”型开沟器,该开沟器可形成“上窄下宽”的开沟效果,不仅具有保墒的作用,还能为补播的豆科和禾本科植物形成生长所需的空斑环境,减轻原生物种对补播物种的地下竞争。课题组前期实验证明,在黑龙江大庆地区(年均降雨量427.5 mm/a)使用“V”型开沟器显著提升了补播苜蓿种苗存活率,平均达67%;而在内蒙古呼伦贝尔地区(年降雨量350~370 mm/a)使用倒“T”型开沟器补播苜蓿出苗数达323.73株/m²,比“V”型开沟器提高213.7%。

2.3 补播技术

在实施补播技术之前,应确定实施区草原退化的程度。根据国家标准《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标GB19377-2003》^[56]的分级,我们制定了针对不同退化程度草原实施的补播技术如下。

若草原为重度退化,补播禾本科牧草,行距15 cm;采用“倒T”型开沟器,开沟深度3~5 cm。补播与施基肥同时进行;种子和磷酸二铵(P₂O₅ $\geq 54\%$)以1:3的比例充分混合后进行机器补播,覆土1~2 cm。

若草原为中度退化,补播苜蓿等豆科植物+禾本科牧草,行距15~20 cm;采用“倒T”型开沟器,开沟深度3~5 cm。补播与施基肥同时进行;将种子和磷酸二铵(P₂O₅ $\geq 54\%$)以1:3的比例充分混合后进行机器补播,覆土1~2 cm。

若草原为轻度退化,补播苜蓿等豆科植物,行距20~30 cm;当补播地区降雨 >400 mm/a采用“V”型开沟器,补播地区降雨 <400 mm/a采用“倒T”型开沟器,开沟深度5 cm。补播与施基肥同时进行,将种子 and 过磷酸钙(P₂O₅ $\geq 12\%$)以1:10的比例混合后播种,覆土1~2 cm。

若草原未退化,不需要补播,可以采用划破草皮或深松改善土壤通气和透水性;但如果为了改善草场质量,可补播苜蓿,方法同轻度退化。

2.4 播后管理与利用

草原植被免耕补播修复后的草原土壤有效氮含量应达到15~25 mg/kg,土壤有效磷含量应达到10~15 mg/kg,土壤速效钾含量应达到100~150 mg/kg,如未达到,可施肥管理。

补播草原一般当年不利用,补播第二年可放牧或

者割草。如果割草,一般在补播豆科初花期(开花率3%以内)或禾本科植物的抽穗期进行,留茬高度为5~10 cm。每次利用后应进行追肥,追肥的种类和数量根据土壤分析和植物生长发育情况具体确定。补播苜蓿等豆科植物草地,一般每年追施过磷酸钙300 kg/ha;并同时追施含有钼、硼微量元素肥料45 kg/ha,采用稀释500~800倍后喷施的方式;补播苜蓿+禾本科植物草地,一般以磷酸二铵为主,施入量为25~30 kg/ha;补播禾本科植物草地,应追施尿素,施入量为50~60 kg/ha;宜降雨前施用,有灌溉条件的地方施肥后应立即灌溉。

3 总结与展望

退化草原植被修复是当前我国草原生态建设最紧迫的任务,免耕补播具备对原生植被和土壤破坏小的特点,在迅速提高草地生产力的同时可维持物种多样性,增加草原碳汇等生态服务功能。本文提出的退化草原免耕补播修复理论与技术,确定了补播物种与退化草原土壤应具中性或正反馈作用,补播应遵循“禾大豆小”空斑原则,补播后草地宜适度利用保持亚顶级群落状态。在此理论指导下,发明了倒“T”型开沟器,提出了补播技术,依据天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标,提出不同退化程度草原植被的免耕补播技术方案。

根据全国地理信息数据库、土壤数据库、全国气候图等相关资料,选择以海拔低于4000 m以下、坡度小于10°、沙粒含量小于50%、降雨量大于300 mm、大于0°C年积温高于1000°C的草原,我们规划出了适宜应用退化草原植被免耕补播修复技术的全国草原面积为4393.16万公顷,约占我国草原总面积(除沼泽类外)的12.60%(表1)。

表1 适宜免耕补播进行高质量草原建设的面积(万公顷)

Table 1 The area of total grassland with reseeding potential in China (10 thousand hectares)

草原资源分区	草原总面积	适宜补播面积	比例(%)
东北区	1417.56	983.64	69.39
东南区	835.77	294.16	35.20
蒙宁区	6547.75	1539.70	23.51
青藏高原区	14027.79	498.46	3.55
西北区	8581.81	192.90	2.25
西南区	2071.94	450.67	21.75
中原区	1392.29	433.63	31.15
总计	34874.91	4393.16	12.60

我国从1979年开始的飞播种草在草原退化、沙化和荒漠化治理中发挥重要作用,但面积逐渐缩小,到2016年中央停止了对飞播种草的财政支持.本文提出的退化草原免耕补播修复理论对飞播草种组合、地面

选择、播后管护等均具有指导意义,有助于再次启动国家飞播种草工程.该理论和技术的应用推广必将进一步加快我国退化草原生态修复治理速度,对草原生态文明建设具有重大意义.

致谢 感谢中国科学院植物研究所多伦生态恢复试验站、呼伦贝尔草地农业生态系统试验站、呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站提供的平台支持,感谢兰州大学梁天刚教授提供地理信息等数据分析的帮助,感谢中国工程院任继周院士对初稿的批评与指正.

参考文献

- Han J G, Zhang Y J, Wang C J, et al. Rangeland degradation and restoration management in China. *Rangel J*, 2008, 30: 233–239
- Ren J Z, Hu Z Z, Zhao J, et al. A grassland classification system and its application in China. *Rangel J*, 2008, 30: 199–209
- Bo L. The rangeland degradation in North China and its preventive strategy. *Sci Agric Sin*, 1997-06
- Liu J, Diamond J. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 2005, 435: 1179–1186
- The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (in Chinese). China Grassland Monitoring Report, 2017 [农业部草原监理中心. 全国草原监测报告, 2017]
- Cease A J, Elser J J, Ford C F, et al. Heavy livestock grazing promotes locust outbreaks by lowering plant nitrogen content. *Science*, 2012, 335: 467–469
- Ma Z G, Wang Y Q. Grassland Restoration and Sustainable Utilization in Northern China (in Chinese). Hohhot: Inner Mongolia University Press, 2013 [马志广, 王育青. 中国北方草原改良与可持续利用. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2013]
- Yan Z M, Zhang Y J, Pan L, et al. Research progress of reseeded forage legumes into natural grassland (in Chinese). *Chin Agric Sci Bull*, 2014, 29: 1–7 [阎子盟, 张玉娟, 潘利, 等. 天然草地补播豆科牧草的研究进展. 中国农学通报, 2014, 29: 1–7]
- Li Y K, Du Y G, Zhang Z Z, et al. Research progresses on seed reseeded to recover the degraded grassland (in Chinese). *Acta Agrest Sin*, 2017, 25: 1171–1177 [李以康, 杜岩功, 张正芝, 等. 种子补播恢复退化草地研究进展. 草地学报, 2017, 25: 1171–1177]
- Tang J C. Current situation and practice of natural grassland improvement—Example of Guangxi (in Chinese). *Anim Breed Feed*, 2019, 2: 1–3 [唐积超. 天然草地改良的现状与措施探讨——以广西为例. 养殖与饲料, 2019, 2: 1–3]
- Yan Z J, Chen M, An Y, et al. Study on improving the degenerated grassland of *Stipa gradis* and *Leymus chinensis* region (in Chinese). *Grassland China*, 2002, 24: 7–14 [闫志坚, 陈敏, 安渊, 等. 大针茅+羊草退化草场改良技术的研究. 中国草地学报, 2002, 24: 7–14]
- Shi J J, Dong Q M, Ma Y S, et al. Technical specification of establishment and utilization of ecotype artificial grassland in black-soil-beach (in Chinese). *Chin Qinghai J Anim Vet Sci*, 2012, 42: 15 [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. 青海畜牧兽医杂志, 2012, 42: 15]
- Wu X Q. Mechanized reseeded improvement mode of native grassland (in Chinese). *Mod Agric Sci Technol*, 2019, 17: 229–232 [吴晓强. 天然草场机械化补播改良模式研究. 现代农业科技, 2019, 17: 229–232]
- Zhang Y J, Yang G W, Liu N. Review of grassland management practices for carbon sequestration (in Chinese). *Acta Pratacult Sin*, 2013, 22: 290–299 [张英俊, 杨高文, 刘楠, 等. 草原碳汇管理对策. 草业学报, 2013, 22: 290–299]
- Li X F, Li Y H, Yun X J. Study and innovation of integrated techniques of forage aviating seeding (in Chinese). *Pratacult Sci*, 2007, 24: 46–49 [李晓芳, 李元华, 俞旭疆. 飞播种草综合配套技术研究及创新. 草业科学, 2007, 24: 46–49]
- Shepherd A, Harris P, Griffith B, et al. Spatial soil variation on the North Wyke Farm Platform. *EGF at 50: The future of European grasslands. Grassland Sci Eur*, 2014, 19: 239–241
- Song C R, Wang N, Peng W D, et al. Advance on reseeded in the grassland vegetation (in Chinese). *Anim Husb Feed Sci*, 2005, 26: 32–34 [宋彩荣, 王宁, 彭文栋, 等. 补播对草地植被影响效果的研究进展. 畜牧与饲料科学, 2005, 26: 32–34]
- Bever J D, Westover K M, Antonovics J. Incorporating the soil community into plant population dynamics: The utility of the feedback approach. *J Ecol*, 1997, 85: 561–573
- van der Putten W H, Bardgett R D, Bever J D, et al. Plant-soil feedbacks: The past, the present and future challenges. *J Ecol*, 2013, 101: 2652–2676
- Van der Putten W H, Van Dijk C, Peters B A M. Plant-specific soil-borne diseases contribute to succession in foredune vegetation. *Nature*, 1993, 362: 53–56
- Mariotte P, Mehrabi Z, Bezemer T M, et al. Plant-Soil Feedback: Bridging natural and agricultural sciences. *Trends Ecol Evol*, 2018, 33: 129–142
- Yang G W. Mechanisms of mycorrhizal fungi and soil nitrogen and phosphorus affecting community productivity changes in the *Stipa Steppe* (in

- Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China Agriculture University, 2014 [杨高文. 菌根真菌与氮磷对针茅草原群落生产力变化的作用机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2014]
- 23 Zhou J, Zhang F, Huo Y, et al. Following legume establishment, microbial and chemical associations facilitate improved productivity in degraded grasslands. *Plant Soil*, 2019, 443: 273–292
 - 24 Waddington J. A comparison of drills for direct seeding alfalfa into established grasslands. *J Range Manage*, 1992, 45: 483–487
 - 25 Krueger C R, Vigil F R. Interseeding alfalfa for grassland improvement in the Northern Great Plains. In: Report of the Twenty-Sixth Alfalfa Improvement Conference, Brookings, South Dakota, 1979
 - 26 Veen G F C, Freschet G T, Ordóñez A, et al. Litter quality and environmental controls of home-field advantage effects on litter decomposition. *Oikos*, 2015, 124: 187–195
 - 27 Ke P J, Miki T, Ding T S. The soil microbial community predicts the importance of plant traits in plant-soil feedback. *New Phytol*, 2015, 206: 329–341
 - 28 Fenner M. Seed Ecology. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 1985
 - 29 Liu N, Kan H M, Yang G W, et al. Changes in plant, soil, and microbes in a typical steppe from simulated grazing: Explaining potential change in soil C. *Ecol Monogr*, 2015, 85: 269–286
 - 30 Kotanen P M. Effects of gap area and shape on recolonization by grassland plants with differing reproductive strategies. *Can J Bot*, 1997, 75: 363–415
 - 31 Grubb P J. The maintenance of species-richness in plant communities: The importance of the regeneration niche. *Biol Rev*, 1977, 52: 107–145
 - 32 Liu G X. Effect of vegetation gap on seedling establishment and competition mechanism of grassland (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China Agriculture University, 2007 [刘桂霞. 草地植被恢复中补播牧草种苗建植的影响因素及竞争机制研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2007]
 - 33 Arunachalam A, Arunachalam K. Influence of gap size and soil properties on microbial biomass in a subtropical humid forest of north-east India. *Plant Soil*, 2000, 223: 187–195
 - 34 Bullock J M. Gaps and seedling colonization. In: Fenner M ed. *Seeds—The Ecology of Regeneration in Plant Communities*. Wallingford: CAB International, 2000. 375–395
 - 35 Silvertown J, Prince S, Smith B. A field-portable instrument for mapping the micro-environment within grass canopies. *Funct Ecol*, 1988, 2: 263–268
 - 36 Silvertown J, Smith B. Gaps in the canopy: The missing dimension in vegetation dynamics. *Vegetatio*, 1988, 77: 57–60
 - 37 Bullock J M, Hill B C, Silvertown J, et al. Gap colonization as a source of grassland community change: Effects of gap size and grazing on the rate and mode of colonization by different species. *Oikos*, 1995, 72: 273–282
 - 38 Zhou J, Zhang Y, Wilson G W T, et al. Small vegetation gaps increase reseeded yellow-flowered alfalfa performance and production in native grasslands. *Basic Appl Ecol*, 2017, 24: 41–52
 - 39 Liu G X, Zhang Y J, Hovstad K A, et al. Competition of *Leymus chinensis* and *Bromus inermis* in response to gap size and neighbouring root exclusion. *Grass Forage Sci*, 2014, 69: 479–487
 - 40 Pywell R F, Bullock J M, Hopkins A, et al. Restoration of species-rich grassland on arable land: Assessing the limiting processes using a multi-site experiment. *J Appl Ecol*, 2002, 39: 294–309
 - 41 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. *Basic Appl Ecol*, 2010, 11: 285–299
 - 42 Zhang Y, Lu W, Zhang H, et al. Grassland management practices in Chinese steppes impact productivity, diversity and the relationship. *Front Agric Sci Eng*, 2018, 5: 57–63
 - 43 Clements F E. *Plant Succession: An Analysis of the Development of Vegetation*. Washington DC: Carnegie Institute, 1916
 - 44 Stringham T K, Krueger W C, Shaver P L. State and transition modeling: An ecological process approach. *J Range Manag Arch*, 2003, 56: 106–113
 - 45 Bai Y, Wu J, Pan Q, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: Evidence from the Eurasian Steppe. *J Appl Ecol*, 2007, 44: 1023–1034
 - 46 Zhang Y J. *Grassland and Farm Management* (in Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2009 [张英俊. 草地与牧场管理学. 北京: 中国农业大学出版社, 2009]
 - 47 Hobbs R J, Mooney H A. Community and population dynamics of serpentine grassland annuals in relation to gopher disturbance. *Oecologia*, 1985, 67: 342–351
 - 48 Platt W J. The colonization and formation of equilibrium plant species associations on badger disturbances in a tall-grass prairie. *Ecol Monogr*, 1975, 45: 285–305
 - 49 Borer E T, Seabloom E W, Gruner D S, et al. Herbivores and nutrients control grassland plant diversity via light limitation. *Nature*, 2014, 508: 517–520

- 50 Mortensen B, Danielson B, Harpole W S, et al. Herbivores safeguard plant diversity by reducing variability in dominance. *J Ecol*, 2018, 106: 101–112
- 51 Kondoh M, Williams I S. Compensation behaviour by insect herbivores and natural enemies: Its influence on community structure. *Oikos*, 2001, 93: 161–167
- 52 Cingolani A M, Noy-Meir I, Díaz S. Grazing effects on rangeland diversity: A synthesis of contemporary models. *Ecol Appl*, 2005, 15: 757–773
- 53 Zhou J, Wilson G W T, Cobb A B, et al. Phosphorus and mowing improve native alfalfa establishment, facilitating restoration of grassland productivity and diversity. *Land Degrad Dev*, 2019, 30: 647–657
- 54 Li Z J, Zhang Y J, Liu G L, et al. No tillage inverted T slot. PRC Patent: CN207266528U, 2017-09-08 [李志杰, 张英俊, 刘贵林, 等. 滚筒式免耕播种倒T型开沟器. 专利, CN207266528U, 2017-09-08]
- 55 Wang Z H, Zhang Y J, Liu G L, et al. One mixed herbage planter. PRC Patent: CN208708118U, 2019-04-09 [王振华, 张英俊, 刘贵林, 等. 一种混播式牧草播种机. 专利, CN208708118U, 2019-04-09]
- 56 Su D X, Zhang Z H, Chen Z Z, et al. Parameters for degradation, sandification and salification of rangelands. GB19377-2003. 2003-11-01 [苏大学, 张自和, 陈佐忠, 等. 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标. GB19377-2003. 2003-11-01]

Summary for “退化草原植被免耕补播修复理论与实践”

Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands

Yingjun Zhang^{1*}, Jiqiong Zhou^{1,2}, Gaowen Yang³, Jingying Jing¹ & Nan Liu¹

¹ College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

² College of Animal Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

³ Institut für Biologie, Freie Universität Berlin, Berlin 14195, Germany

* Corresponding author: zhangyj@cau.edu.cn

There are 400 million hectares of grasslands in China, accounting for about 40.7% of the Chinese territory, which provide fundamental ecological and economic benefits. However, more than 90% of this grassland ecosystem is threatened by degradation. This leads to the loss of biodiversity and a decrease in ecosystem functions, such as productivity, soil preservation and pest control. Currently, restoration of degraded grasslands is the most urgent task for grassland ecological management in China. No-tillage reseeding is one of the best practical technologies for grassland vegetation regeneration, because of the significant opportunity to improve productivity and plant diversity through establishing suitable species with minimum disturbance of the soil. Here we present a conceptual framework, which integrates plant-soil feedbacks, gap principles, and subclimax management models to guide our understanding of no-tillage reseeding. The key components of no-tillage reseeding in degraded grasslands consist of the selection of reseeding species, reseeding technology and reseeded grassland management. Native plants can affect the success of establishing species in revegetation due to competition for light, nutrients and water, and revegetation species with neutral or positive plant-soil feedbacks must be selected that can establish under these conditions. Our previous studies show that small light gaps can increase the performance of reseeded legumes, while larger light and soil gaps are needed for grass reseeding. Therefore, we predict that small gaps for legumes and large gaps for grasses will benefit these species respectively in no-tillage reseeding. According to the subclimax management model, suitable grassland management, for instance, mowing, grazing and fertilization, can maintain plant community composition, productivity and biodiversity, when the target species were successfully established. On the basis of this conceptual framework, no-tillage reseeding technology has been invented and applied in the semi-arid and semi-humid degraded grassland, and the plan for degraded grassland restoration nation-wide is proposed. We invented the “T” and “V” slot opener, which will result in minimal disturbance and help to maintain soil moisture after no-tillage reseeding. Given that plants differ in their ability to use soil nutrients; phosphorus, boron and molybdenum fertilization is recommended for legume reseeding and maintenance, while nitrogen fertilization can be applied to improve the performance of grasses. In summary, our study presents the scientific hypotheses and a framework for no-tillage reseeding technology, which will advance our understanding of successful grassland restoration and play an important role in sustainable grassland development in China.

grassland restoration, revegetation, no-tillage reseeding, productivity, plant diversity

doi: [10.1360/TB-2020-0224](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0224)