

# 呼伦贝尔退化草原土壤养分调控的原理与技术

刘伟<sup>1</sup> 郝毅晴<sup>1,2</sup> 孙佳美<sup>1</sup> 王璟<sup>1</sup> 范冰<sup>3</sup> 郝建玺<sup>3</sup> 金那申<sup>4</sup> 潘庆民<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 国家植物园, 北京 100093; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup>呼伦贝尔生态产业技术研究院, 内蒙古海拉尔 021008; <sup>4</sup>内蒙古呼伦贝尔林业集团, 内蒙古海拉尔 021008

**摘要** 退化草原恢复是中国草原管理与可持续利用面临的瓶颈问题。养分亏缺是退化草原难以恢复的一个主要限制因子。土壤养分调控的本质是在补充土壤养分的前提下, 调控植物群落组成, 恢复退化草原原有优势种, 提高生产力和优质牧草比例, 并减少养分添加导致的负面环境效应。该研究基于在呼伦贝尔退化草原开展的恢复实验, 依据退化草原土壤养分亏缺现状、植物生长的限制元素以及不同物种的养分需求特性, 提出了退化草原土壤养分调控技术, 其关键过程包括“以需定量、氮磷协同、补充微肥、早春施肥、深施入土、条带作业”6个技术环节。土壤养分调控技术在我国呼伦贝尔草原具有广泛的应用前景。退化草原生产功能和生态功能的提升对于提高农牧民收入、保障我国饲草安全、维护我国北方生态安全和民族团结具有重要意义。

**关键词** 草原退化; 草甸草原; 限制元素; 施肥; 生产力

刘伟, 郝毅晴, 孙佳美, 王璟, 范冰, 郝建玺, 金那申, 潘庆民 (2025). 呼伦贝尔退化草原土壤养分调控的原理与技术. 植物生态学报, 49, 138-147. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0124

## Theory and application of soil nutrient regulation for degraded steppe in Hulun Buir, China

LIU Wei<sup>1</sup>, HAO Yi-Qing<sup>1,2</sup>, SUN Jia-Mei<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, FAN Bing<sup>3</sup>, HAO Jian-Xi<sup>3</sup>, JIN Na-Shen<sup>4</sup>, and PAN Qing-Min<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, China National Botanical Garden, Beijing 100093, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>3</sup>Hulun Buir Ecological Industry Technology Research Institute, Hailar, Nei Mongol 021008, China; and <sup>4</sup>Hulun Buir Forestry Group, Hailar, Nei Mongol 021008, China

### Abstract

**Aims** In China, the restoration of degraded grasslands is impeding the management of grasslands and their sustainable utilization. Soil nutrient deficiency is one of the main constraints for restoring degraded grassland. The essence of soil nutrient regulation is to restore the original dominant species, promote grassland productivity and the occupancy of high-quality forage in degraded grasslands, and meanwhile diminish the negative environmental effects caused by nutrient addition.

**Methods** Taking advantage of a restoration experiment carried out in a degraded grassland of Hulun Buir, in terms of the deficient soil nutrients, the limiting elements for plant growth and the nutrient specificity for different plant species, we developed soil nutrient regulation technique.

**Important findings** The key technical points are as follow: demand-based dosage, synergy of nitrogen and phosphorus, microelements supplementation, early-spring fertilization, deep fertilization and strip operation. Soil nutrient regulation technique has broad prospects in application in Hulun Buir grassland, China. Improving the productive and ecological functions of degraded grasslands is of great significance for increasing the income of farmers and herders, ensuring the security of fodder grass supply, and safeguarding ecological security and national unity in northern China.

**Key words** grassland degradation; meadow steppe; limiting element; fertilization; productivity

Liu W, Hao YQ, Sun JM, Wang J, Fan B, Hao JX, Jin NS, Pan QM (2025). Theory and application of soil nutrient regulation for degraded steppe in Hulun Buir, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 49, 138-147. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0124

收稿日期Received: 2024-04-23 接受日期Accepted: 2024-09-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类) (XDA26020101)、国家自然科学基金(32230069)、国家重点研发计划(2022YFF1302100)和内蒙古自治区科技成果转化专项(2020CG0124)。Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA26020101), the National Natural Science Foundation of China (32230069), the National Key R&D Program of China (2022YFF1302100), and the Nei Mongol Autonomous Region Science and Technology Achievement Transformation Special Fund Project (2020CG0124).

\* 通信作者Corresponding author (pqm@ibcas.ac.cn)

我国草原约293万km<sup>2</sup>, 占国土面积的1/3, 具有重要的生产和生态功能(方精云等, 2018)。自20世纪80年代以来, 我国的草原开始大面积退化, 退化草原的面积一度超过90%。草原退化不仅直接导致牧草产量和品质下降, 降低了其生产功能; 而且严重影响到生物多样性、水源涵养以及碳储存等生态功能(王德利等, 2020)。为了恢复退化的草原, 自2000年以来, 我国陆续实施了“京津风沙源治理”“退牧还草”“天然草原保护”等多个重大生态工程, 一定程度上遏制了草原退化的势头。但由于受气候变化和人类活动的双重影响, 70%的草原仍存在不同程度的退化状态, 我国草原“局部好转、整体恶化”的态势并没有得到根本改变(方精云等, 2016; 国家林业和草原局, 2021)。目前, 退化草原恢复已经成为实现联合国可持续发展目标和联合国生态系统修复十年计划(2021年–2030)的核心工作(Dudley et al., 2020; Bardgett et al., 2021), 也是我国草原可持续利用的迫切需求。

草原退化包括植被退化和土壤退化。植被退化主要是指在不合理管理与超限利用条件下植物群落发生逆行演替, 导致牧草产量和质量下降。在轻度、中度和部分重度退化阶段, 草原植物种类尚未发生明显改变, 只是优势种的地位发生了变化(刘钟龄等, 2002)。土壤退化是指草原在过度利用条件下, 大量土壤养分通过牲畜粪便(36%)或以牧草收获的方式(87%)输出草原生态系统, 造成土壤氮严重亏缺(Giese et al., 2013)。在内蒙古温带典型草原, 退化草原与毗邻的长年围封样地相比较, 0–100 cm土壤全碳和全氮储量均下降超过50% (He et al., 2008)。有研究表明, 土壤养分不足或失衡是导致退化草原生物多样性和生产力下降的重要原因(贺金生等, 2020; 潘庆民等, 2023)。因此, 对于植物种类组成没有发生明显改变, 原有优势种尚存的轻度、中度和部分重度退化草原, 土壤养分调控是实现退化草原恢复的有效方法。

退化草原土壤养分调控能够解除土壤的养分限制, 快速恢复植被生产力, 实现退化草原生产和生态功能同步提升(贺金生等, 2020)。以往有关草原施肥的研究大多以探究氮沉降的影响为目的, 主要在未退化的群落中进行, 有些研究发现草原施肥效果不理想(王晶等, 2016), 而长期过量的氮添加还可能导致草原群落的物种多样性下降(Zhang et al., 2014),

这些研究结果影响了土壤养分调控技术在退化草原恢复过程中的应用。而未退化群落和退化群落生物多样性和植被生产力对氮添加的响应存在显著差异(Bai et al., 2010)。因此, 通过施肥恢复退化草原, 需要根据草原类型和退化程度, 确定肥料的种类、用量、施肥时期以及施肥方法等关键环节。近几年, 我们以呼伦贝尔退化草原为对象, 以解除养分限制瓶颈为突破口, 研发了土壤养分调控技术, 不仅实现了牧草产量和优质牧草比例的显著提升, 而且保证了物种多样性没有降低, 极大地提高了退化草原恢复的速度和效率, 使恢复年限从传统的20–25年(李博等, 1980)缩短为2年左右, 为我国温带退化草原恢复提供了借鉴。

## 1 退化草原土壤养分调控的原理

退化草原土壤养分调控的核心是通过补充土壤养分以调控植物群落组成, 特别是物种多度或密度的变化, 从而促进退化草原原有优势种的恢复(图1)。土壤养分调控从草原生态系统的养分循环入手, 首先阐述了退化草原土壤养分损失现状, 分析了退化草原的主要限制元素; 然后探讨了退化草原不同植物种对限制元素的响应; 最后, 通过阐明土壤养分调控的适宜时期与施用量, 实现土壤养分调控在退化草原中的应用。

### 1.1 草原生态系统的养分循环与退化草原的土壤养分损失

在草原生态系统中, 植物、动物和微生物的生理活动共同维持了生物地球化学循环的动态平衡。植物作为生产者, 从大气中固定碳, 不仅补充了呼吸过程中从生态系统释放的碳, 而且为消费者提供食物, 而豆科植物通过生物固氮补充了土壤矿化过程中产生的气态氮损失。动物作为消费者通过采食植物, 又以粪尿的形式将绝大多数养分归还到土壤中。有研究表明, 在放牧场牲畜采食的牧草生物量有60%–95%以粪便的形式又回归到土壤中(Wilkinson & Lowrey, 1973)。微生物作为分解者, 将动植物残体以及粪便等有机物分解成植物可以重新吸收利用的营养元素。因此, 在一个健康的草原生态系统中, 各种元素在植物、土壤和微生物中形成闭环, 维持了土壤营养元素的动态平衡。

在过度放牧或连年打草等不合理管理利用方式下, 草原生态系统生物地球化学循环的平衡状态被

打破。在放牧场, 过度放牧导致土壤中的养分通过牲畜被带出生态系统而得不到归还, 土壤养分入不敷出, 造成土壤养分失衡。据测算, 如果按1.5个羊单位·hm<sup>-2</sup>的放牧强度计算, 每年草地将损失纯氮4.8–10 kg·hm<sup>-2</sup>, 纯磷0.5–1.0 kg·hm<sup>-2</sup> (潘庆民等, 2018)。我们比较了连年重度放牧地和围封样地的土壤养分状况, 结果发现, 与40年围封样地相比, 连年重度放牧样地的土壤全碳、氮、磷含量分别降低了40.1%、39.9%和62.5% (未发表数据)。

在打草场, 由于要收获干草且没有家畜粪便的养分归还, 土壤养分亏缺比放牧场更为严重。通过

测定呼伦贝尔羊草(*Leymus chinensis*)草原群落水平的氮磷含量(氮、磷含量平均值分别为22.6和1.4 g·kg<sup>-1</sup>), 我们发现, 按21.1 kg·hm<sup>-2</sup>氮沉降、0.6 kg·hm<sup>-2</sup>磷沉降速率计算(Liu et al., 2013; Du et al., 2016), 若牧草产量维持在750 kg·hm<sup>-2</sup> (折合每亩50 kg), 氮、磷收支基本持平; 若牧草产量维持在1 500 kg·hm<sup>-2</sup>, 则需要补充氮12.8 kg·hm<sup>-2</sup>, 需要补充磷1.5 kg·hm<sup>-2</sup>, 若牧草产量维持在2 250 kg·hm<sup>-2</sup>, 则需要补充氮29.7 kg·hm<sup>-2</sup>, 需要补充磷2.5 kg·hm<sup>-2</sup> (图2)。如果连续10年打草, 每年收割牧草2 250 kg·hm<sup>-2</sup>, 则氮、磷净支出分别约300和25 kg·hm<sup>-2</sup>。



图1 退化草原土壤养分调控原理技术路线。

Fig. 1 Technical roadmap of soil nutrient regulation technology in degraded grassland.

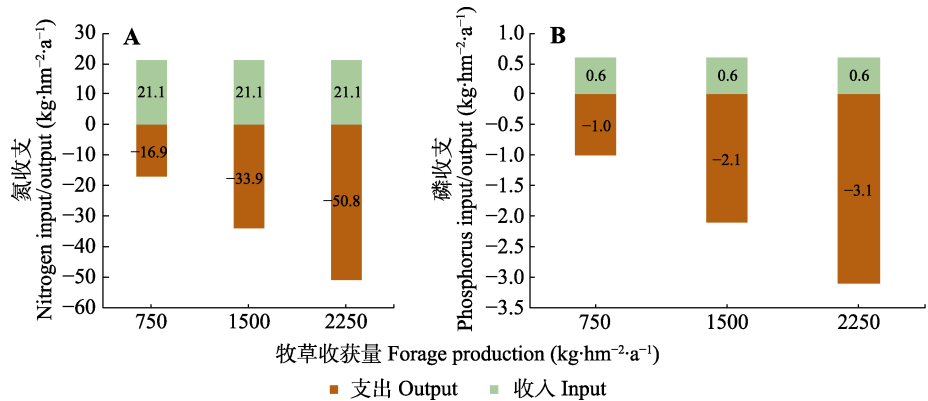


图2 呼伦贝尔羊草草原打草场不同牧草收获量下的氮磷收支。

Fig. 2 Nitrogen and phosphorus budget under different forage production of *Leymus chinensis* steppe in Hulun Buir.

因此, 草原若维持较高的牧草产量(如  $2\,250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 一定需要补充氮磷养分。

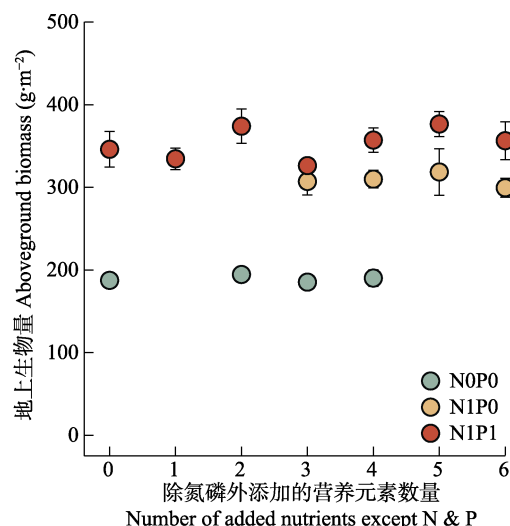
## 1.2 草原群落生产力的氮磷共同限制

近年来, 越来越多的研究发现, 草原植被生产力受到氮和磷的共同限制(Harpole et al., 2011)。全球尺度的meta分析表明, 氮和磷添加分别增加了33.2%和14.2%的地上净初级生产力, 并且氮磷共同添加对地上净初级生产力具有协同效应(Li et al., 2022)。也有研究发现, 在低温、高纬度的山地草原地区, 有59%的区域受氮限制, 而在高温、低纬度地区的温带草原, 受磷限制更为严重, 约占该区域面积的52% (Du et al., 2020)。除氮磷之外, 钾能够提高豆科植物和禾草的抗性, 钾缺乏会降低共生固氮的效率(Liu et al., 2022)。硫作为植物生长所需的大量元素, 在非母岩地区可能会缺乏。低剂量的外源硫添加可能会促进草原植物对氮磷的协同吸收, 对草原生产力有一定的促进作用(姜勇等, 2019)。牧草生长所需的其他微量元素还包括硼、铜、铁、锰、锌等营养元素。具体到呼伦贝尔草原, 在中国科学院额尔古纳森林草原过渡带生态系统研究站开展的多元素养分添加实验表明, 在利用霍格兰营养液配置的氮、磷、钾、钙、硫、镁、铁与微量元素(碘、硼、锰、锌、钠、钼、铜、钴和氯作为一个因子) 8种养分添加因子中, 氮添加或氮磷共同添加均显著增加了群落地上生物量, 其中, 氮磷共同添加的处理效应更为显著(图3)。

为了进一步确定肥料的氮磷比例, 我们在呼伦贝尔草原开展了同一氮含量水平下不同氮磷比的实验, 氮添加量为  $10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  (Bai et al., 2010)。3年(2021–2023年)的数据表明, 氮磷比例为2.5:1较为适宜, 过多的磷肥(即更小的N:P)处理, 增产效果并不显著, 并且会造成资源浪费(图4)。

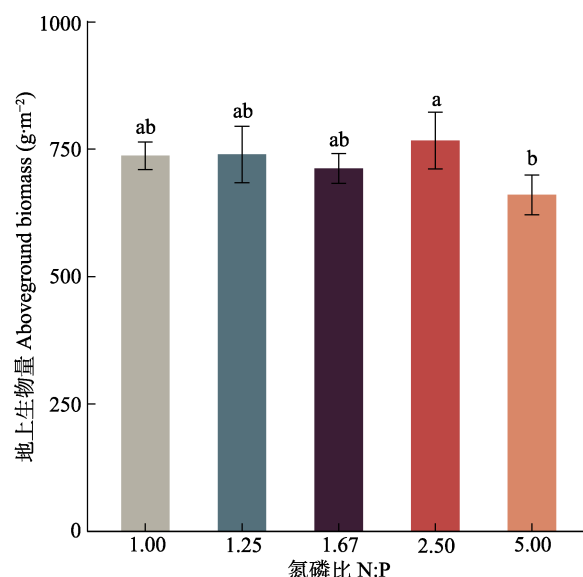
## 1.3 不同植物种的养分需求特异性

草原群落是由多个物种组成的, 而不同植物种具有鲜明的养分需求特异性(陈佐忠等, 1985)。植物群落中的物种组成决定了养分添加的种类和数量。当群落中以禾草为主, 一般需要额外添加氮以快速提高禾草比例和牧草质量。当群落中豆科植物地上生物量的比例超过40%, 一般不需要额外添加氮, 依靠生物固氮即可满足生态系统对氮的需求(Lemus, 2012)。羊草草原退化演替的物种组成变化表现为羊草和大针茅(*Stipa grandis*)等高大禾草的优



**图3** 添加不同数量的营养元素对呼伦贝尔草原地上生物量的影响(平均值 $\pm$ 标准误)。8种养分添加因子分别为氮、磷、钾、钙、硫、镁、铁与微量元素(碘、硼、锰、锌、钠、钼、铜、钴和氯作为一个因子)。N0P0, 不添加氮磷元素; N1P0, 添加氮; N1P1, 氮磷共同添加。氮磷添加量分别为20和 $2.95\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  (Peng et al., 2022)。

**Fig. 3** Effects of different numbers of added nutrients on aboveground biomass in Hulun Buir steppe (mean  $\pm$  SE). Eight nutrient factors are nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, sulfur, magnesium, iron and micronutrients (iodine, boron, manganese, zinc, sodium, molybdenum, copper, cobalt and chlorine as one factor). N0P0, no nitrogen and phosphorus addition; N1P0, nitrogen addition; N1P1, nitrogen and phosphorus co-addition. The amount of nitrogen and phosphorus added is 20 and  $2.95\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  (modified from Peng et al., 2022).



**图4** 不同氮磷比对呼伦贝尔草原地上生物量的影响(平均值 $\pm$ 标准误,  $n = 12$ )。不同小写字母代表差异显著( $p < 0.05$ )。

**Fig. 4** Effects of different nitrogen to phosphorus ratio (N:P) on aboveground biomass in Hulun Buir steppe (mean  $\pm$  SE,  $n = 12$ ). Different lowercase letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).

势地位被糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)和星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)等低矮的植物所取代(李永宏, 1988)。因此, 要恢复草原群落的结构, 特别是原生优势种在群落中的优势地位, 需要根据该类植物的养分需求特征进行养分补充(贺金生等, 2020)。在呼伦贝尔退化草原, 单独氮添加显著提高了群落地上生产力, 特别是根茎型禾草的相对生物量, 但降低了多年生杂类草和丛生禾草的相对生物量。而单独磷添加对群落地上生产力并没有显著影响, 但增加了多年生杂类草和豆科植物的相对生物量。氮磷共同添加减缓了单独氮添加对多年生杂类草和豆科植物的抑制作用, 通过增加禾草特别是根茎禾草的地上生物量显著增加了群落地上生物量(王洪义等, 2020)。

#### 1.4 融雪期(4月)与生长季(7月)施肥的效应

植物对养分的吸收与水分吸收紧密耦联, 充足的水分是养分高效吸收的基础。由于呼伦贝尔草原一般冬季降雪较多, 在融雪期施肥, 能够充分利用融雪水, 可以实现肥跟水走, 水肥同步的效果。同时, 在呼伦贝尔草原, 相对于杂类草来说, 优质禾草(如羊草、冰草(*Agropyron cristatum*)等)大多属于多年生植物, 早春返青快, 分蘖发生早。因此, 早春施肥能够满足禾草在生长季早期对养分的需求, 提高禾草的分蘖能力, 进而提高禾草在群落中的密度及竞争优势。我们在呼伦贝尔退化草原开展了不

同时期的氮磷养分添加实验, 氮磷添加量分别为10和3 g·m<sup>-2</sup>。结果表明, 4月融雪期和7月植物生长旺季进行养分添加均显著增加了地上生物量, 并且4月养分添加的效果要显著好于7月(图5A)。其中, 4月养分添加处理, 羊草的密度和种群地上生物量比对照分别增加了19.8和25.0倍(图5B、5C)。

#### 1.5 不同施肥量对草原群落生产力的影响

在确定合适的养分添加量时, 要充分考虑土壤养分的供应状况以及退化草原植物群落对养分的需求。氮作为植物生长的主要限制元素, 补充氮可以促进植物生长, 提高退化草原的地上生物量。但植物地上生物量对氮添加具有饱和效应, 当外源氮添加超过植物的养分需求时, 地上生物量将不再增加。并且, 过量的氮添加会导致土壤酸化, 增加氨挥发及淋融损失, 并会降低生物多样性, 提高恢复成本, 不利于退化草原恢复技术的应用(Korfanta et al., 2015; Humbert et al., 2016)。另外, 已有研究表明, 磷的添加在一定程度上能够提高呼伦贝尔退化草原杂类草和豆科植物的相对生物量(王洪义等, 2020)。目前有关氮添加对草原地上生物量的饱和阈值已经开展了大量研究(Bai et al., 2010; Peng et al., 2020), 但饱和阈值变化幅度比较大, 多数氮添加的实验模拟氮沉降, 与生产实际不相符, 很难应用到退化草原的恢复应用中。并且现有的研究很少考虑到氮磷共同添加时, 地上生物量的饱和阈值。因此, 为阐明

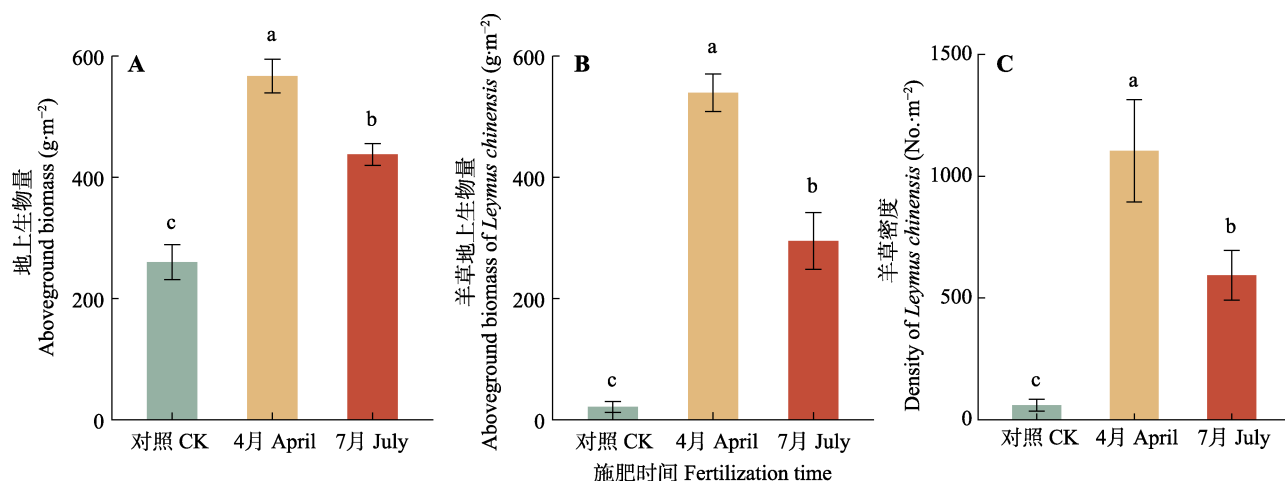


图5 不同养分添加时期对呼伦贝尔草原地上生物量(A)、羊草地上生物量(B)和羊草密度(C)的影响(平均值±标准误,  $n = 6$ )。对照为不施肥处理, 4月和7月表示施肥时间。氮磷添加量分别为10和3 g·m<sup>-2</sup>。不同小写字母代表不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 5 Aboveground biomass of all species (A), *Leymus chinensis* (B) and the density of *Leymus chinensis* (C) under different timing of nutrient addition in Hulun Buir steppe (mean ± SE,  $n = 6$ ). CK stands for no fertilization. April and July stand for fertilization time. Nutrient additions are 10 and 3 g·m<sup>-2</sup>, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ( $p < 0.05$ ).



呼伦贝尔退化草原养分添加的最适量, 我们在中度退化草原, 利用免耕播种机开展了养分添加的梯度实验。结果表明, 当在4月融雪期氮添加 $9.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  + 磷添加 $3.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 地上生物量达到最大值(图6A)。与未施肥的对照相比, 地上生物量由 $181 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 提高到 $678 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 提高了2.7倍, 羊草地上生物量比例由15%提高到68% (图6B), 并且单次养分添加并没有降低生物多样性(图6C)。

## 2 呼伦贝尔退化草原土壤养分调控技术

### 2.1 技术要点

基于以上技术原理, 我们研发了退化草原土壤养分调控技术, 主要包括: “以需定量、氮磷协同、补充微肥、早春施肥、深施入土、条带作业” 6个技术环节。

### 2.2 以需定量

养分添加量的确定以土壤养分测试和退化草原养分输出量为基础, 根据牧草的需肥规律来确定(表1)。土壤养分添加以氮磷为主。对于中度退化的草甸或典型草原, 氮的最适用量约为 $80\text{--}100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 可根据退化程度及牧草产量进一步调整; 根据氮磷协同的原则, 磷肥补充量以 $20\text{--}25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜。内蒙古草原土壤钾含量丰富, 一般不需要额外补充钾肥。当土壤检测表明 $0\text{--}15 \text{ cm}$ 土壤钾含量低于 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 需补充一定量的钾。有机肥中含有丰富的有机碳

以及微量元素, 退化草原恢复过程中采用有机肥配施无机肥(有机肥 $15\text{--}45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  + 氮肥 $45\text{--}75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )可显著增加退化草原生产力和优质禾草比例。

### 2.3 氮磷协同

养分添加类型的选择主要考虑目标物种对养分的需求。我国草原地区物种以禾草占优势, 豆科植物地上生物量仅占整个群落地上生物量的3%–10% (牛书丽和蒋高明, 2004)。根据我们的实验结果, 氮磷比例约为2.5:1时, 氮磷比表现出显著的协同效应, 特别有利于禾本科牧草的恢复。

### 2.4 补充微肥

呼伦贝尔草原土壤铁离子缺乏, 可以适当补充, 此外, 钼和锌可以提高植物的光合能力, 根据测土配方的情况, 可以适当补充。对于微量元素缺乏的地区, 建议于5月初地表喷施或6月中旬叶面喷施 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液(有效成分)分别为 $2\text{--}3$ 、 $3\text{--}4.5$ 和 $0.75\text{--}1.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表1 呼伦贝尔退化草原土壤氮磷含量及对应氮磷施用量

Table 1 Soil nitrogen (N) and phosphorus (P) content in Hulun Buir degraded grassland and corresponding nitrogen and phosphorus application rates

土壤全氮含量 Soil total N content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	土壤全磷含量 Soil total P content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	氮施用量 N application rate ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	磷施用量 P application rate ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
<1.5	<0.3	80–100	20–25
1.5–2.5	0.3–0.4	60–80	15–20
$\geq 2.5$	$\geq 0.4$	40–60	10–15

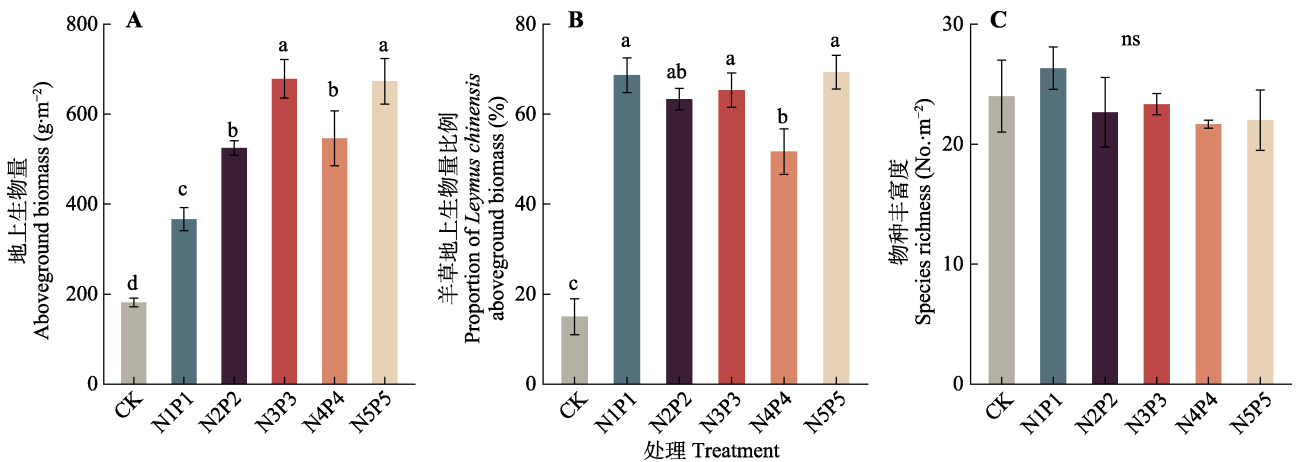


图6 不同养分添加处理下呼伦贝尔草原地上生物量(A)、羊草地上生物量比例(B)和物种丰富度(C)的变化(平均值 $\pm$ 标准误,  $n = 5$ )。CK、N1P1、N2P2、N3P3、N4P4、N5P5分别表示对照、添加 $4.8 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 1.5 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $7.2 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 2.25 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $9.6 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 3.0 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $12.0 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 3.75 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $14.4 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 4.5 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ , N, 氮; P, 磷。不同小写字母代表不同处理间差异显著( $p < 0.05$ ); ns,  $p > 0.05$ 。

Fig. 6 Aboveground biomass (A), biomass proportion of *Leymus chinensis* (B) and species richness (C) under different nutrient addition treatments in Hulun Buir steppe (mean  $\pm$  SE,  $n = 5$ ). CK, N1P1, N2P2, N3P3, N4P4, N5P5 stand for no addition, addition of  $4.8 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 1.5 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $7.2 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 2.25 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $9.6 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 3.0 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $12.0 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 3.75 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $14.4 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} + 4.5 \text{ g P} \cdot \text{m}^{-2}$ , respectively; N, nitrogen; P, phosphorus. Different lowercase letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ); ns,  $p > 0.05$ .

## 2.5 早春施入

施肥时期一般选择在早春融雪期(4月初至5月初)进行,即冬春交替时首次白天气温连续5天超过0℃起一个月内。由于冬季积雪较多,春季融雪期土壤水分充足,并且较低的温度减少了氨挥发损失。若冬季降雪较少,也可选择早春土壤温度小于5℃,降雨量大于5 mm时进行。

## 2.6 深施入土

施肥可采用免耕播种机,将肥料施入地表下3–5 cm。免耕播种机开沟器宜采用前排波纹盘,配合后排双圆盘以减少对地表的破坏和土壤水分散失。不同于氮和硫,磷、钾很难在土壤中移动,因此,深施相对于地表撒施来说可以显著提高该类养分的利用效率。对于固体有机肥,以机械抛洒为主;对于液体有机肥(主要为牲畜尿液),采用注射施肥机将肥料注入表层以下3–5 cm能够显著提高肥料利用率,减少挥发和径流损失。

## 2.7 条带作业

在进行养分调控时,建议采用条带间隔的方式进行作业,即一条施肥条带与一条未施肥条带相间,其中,施肥条带行间距为20–30 cm。未施肥区条带宽度不少于6 m,以确保区域尺度的物种多样性不会下降。待处理条带完全恢复(一般1–2年),再对未施肥的条带进行施肥处理。

## 3 实施案例

近年来,退化草原土壤养分调控技术在呼伦贝尔草原开展了大面积的示范应用。以呼伦贝尔市谢尔塔拉农牧场为例,该区域属于寒温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温为−1.5℃,年降水量约350 mm,土壤类型为黑钙土。原生植被优势种为羊草,由于连年打草,目前处于中度退化状态,羊草地上生物量比例不足20%,地上生物量显著下降。

2022年,谢尔塔拉农牧场采用退化草原土壤养分调控技术对约5 333 hm<sup>2</sup> (8万亩)集中连片打草场进行了改良(图7)。在4月5–15日,示范区使用免耕播种机进行草地适用肥作业。播种机行距为20 cm,播深为3–5 cm,适用肥播量为300 kg·hm<sup>−2</sup>,折合氮磷养分添加量为97.5和30.0 kg·hm<sup>−2</sup>。在进行土壤养分调控时,采用条带间隔方式进行作业,以确保生物多样性不会下降。处理区和对照区条带宽度分别为

12 和6 m。

2022年8月份,对退化草原土壤养分调控技术的应用效果进行了样方调查,并开展了测产验收。该技术的示范应用取得了显著的效果。与对照区相比,处理区地上生物量由209.8 g·m<sup>−2</sup>增加到578.8 g·m<sup>−2</sup>,增加了1.76倍;优质牧草地上生物量比例由33.0%提高到56.1%,提高了69%;羊草密度由116.5 株·m<sup>−2</sup>提高到488.8 株·m<sup>−2</sup>,提高了3.2倍;生物多样性没有显著变化(图7A–7D)。

## 4 结语

目前,退化草原土壤养分调控技术已经在内蒙古自治区呼伦贝尔市、锡林郭勒盟、赤峰市和兴安盟推广应用约8.7万hm<sup>2</sup> (130多万亩),均取得了显著的恢复效果。主要表现为:(1)牧草产量提高。少雨年份牧草产量增加50%以上,多雨年份牧草产量能够增加1–2倍。(2)优质牧草地上生物量比例增加。优质牧草地上生物量(如羊草)的比例可以在1–2年内由10%提高到60%–80%,从而实现群落结构的快速恢复。(3)降水利用效率提高,该技术不需灌溉,主要是充分利用融雪水和自然降水,使降水利用效率提高1–2倍。(4)生物多样性得以维持,1–2年的施肥处理没有降低物种多样性,有些区域还有所增加,可能是过度放牧导致多样性降低后的反弹。(5)恢复速度快,能够在1–2年内快速恢复到以优质禾草为优势种的原生群落结构。

退化草原土壤养分调控技术在呼伦贝尔退化草原的应用具有显著的生态效益。该技术的实施改善了退化草原的土壤环境,显著提高了植被盖度及植株密度,有效降低了风沙侵蚀和水土流失。生态环境的改善带动了当地旅游业的发展,为绿色转型升级创造了条件。此外,该技术的实施具有显著的经济效益。牧草产量,特别是优质牧草产量的提升可为当地畜牧业的发展提供优质饲草。以该区域广泛分布的羊草草原为例,呼伦贝尔原有羊草草原1.8万km<sup>2</sup> (李博等, 1980),我国羊草草原面积约22万km<sup>2</sup> (李绍良等, 1993)。如果10%的面积得到恢复并培育为高产羊草草原,以每hm<sup>2</sup>干草产量提高750 kg为例,则每年可增加优质牧草170万t,约相当于2021年我国进口干草(约199万t)总量的90%,能够有效保障我国的饲草安全。

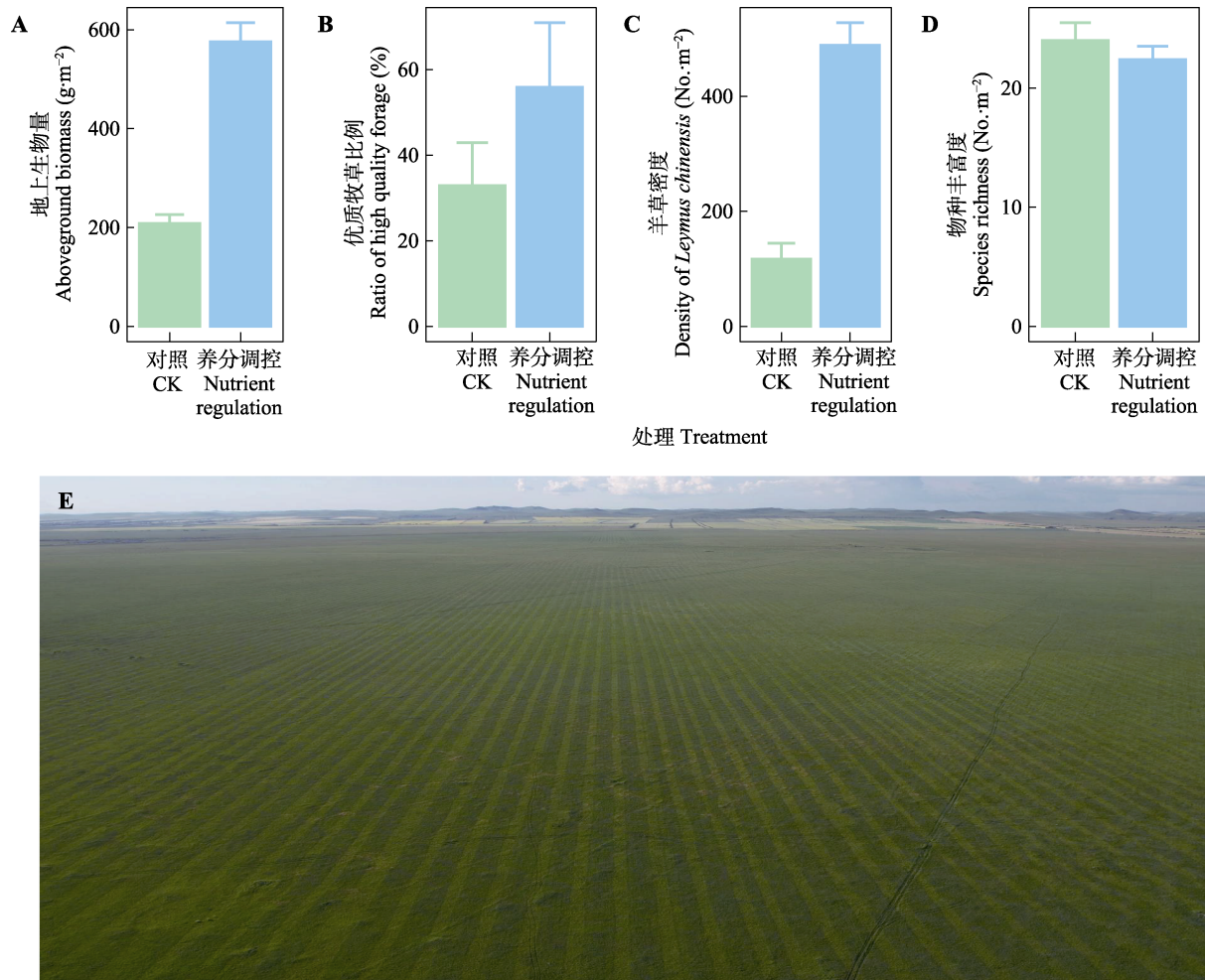


图7 土壤养分调控技术应用对地上生物量(A)、优质牧草地上生物量比例(B)、羊草密度(C)、物种丰富度(D)的影响(平均值±标准误,  $n = 5$ )及航拍图(E)。

**Fig. 7** Effects of nutrient regulation and restoration technology on aboveground biomass (A), the ratio of high-quality forage (B), the density of *Leymus chinensis* (C), species richness (D) (mean  $\pm$  SE,  $n = 5$ ) and the aerial photography (E).

## 参考文献

- Bai Y, Wu J, Clark CM, Naeem S, Pan Q, Huang J, Zhang L, Han X (2010). Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from Inner Mongolia Grasslands. *Global Change Biology*, 16, 358-372.
- Bardgett RD, Bullock JM, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, Fry EL, Johnson D, Lavallee JM, Le Provost G, Luo S, Png K, Sankaran M, et al. (2021). Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 720-735.
- Chen ZZ, Huang DH, Zhang HF (1985). The characteristics of element chemistry of 122 plant on the Xilin River valley, Inner Mongolia/Inner Mongolia grassland ecosystem research station, the Chinese Academy of Sciences. *Research on Grassland Ecosystem*. Science Press, Beijing. 112-131. [陈佐忠, 黄德华, 张鸿芳 (1985). 内蒙古锡林河流域122种植物的元素化学特征//中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站, 草原生态系统研究. 科学出版社, 北京. 112-131.]
- Du E, de Vries W, Han W, Liu X, Yan Z, Jiang Y (2016). Imbalanced phosphorus and nitrogen deposition in China's forests. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 8571-8579.
- Du E, Terrer C, Pellegrini AFA, Ahlström A, van Lissa CJ, Zhao X, Xia N, Wu X, Jackson RB (2020). Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation. *Nature Geoscience*, 13, 221-226.
- Dudley N, Eufemia L, Fleckenstein M, Periago ME, Petersen I, Timmers JF (2020). Grasslands and savannahs in the UN decade on ecosystem restoration. *Restoration Ecology*, 28, 1313-1317.
- Fang JY, Geng XQ, Zhao X, Shen HH, Hu HF (2018). How many areas of grasslands are there in China? *Chinese Science Bulletin*, 63, 1731-1739. [方精云, 耿晓庆, 赵霞, 沈海花, 胡会峰 (2018). 我国草地面积有多大? 科学通报, 63, 1731-1739.]



- Fang JY, Pan QM, Gao SQ, Jing HC, Zhang WH (2016). "Small vs. Large Area" principle: protecting and restoring a large area of natural grassland by establishing a small area of cultivated pasture. *Pratacultural Science*, 33, 1913-1916. [方精云, 潘庆民, 高树琴, 景海春, 张文浩 (2016). "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, 33, 1913-1916.]
- Giese M, Brueck H, Gao Y, Lin S, Steffens M, Kögel-Knabner I, Glindemann T, Susenbeth A, Taube F, Butterbach-Bahl K, Zheng X, Hoffmann C, Bai Y, Han X (2013). N balance and cycling of Inner Mongolia typical steppe: a comprehensive case study of grazing effects. *Ecological Monographs*, 83, 195-219.
- Harpole WS, Ngai JT, Cleland EE, Seabloom EW, Borer ET, Bracken MES, Elser JJ, Gruner DS, Hillebrand H, Shurin JB, Smith JE (2011). Nutrient co-limitation of primary producer communities. *Ecology Letters*, 14, 852-862.
- He JS, Liu ZP, Yao T, Sun SC, Lü Z, Hu XW, Cao GM, Wu XW, Li L, Bu HY, Zhu JX (2020). Analysis of the main constraints and restoration techniques of degraded grassland on the Tibetan Plateau. *Science & Technology Review*, 38(17), 66-80. [贺金生, 刘志鹏, 姚拓, 孙书存, 吕植, 胡小文, 曹广民, 吴新卫, 李黎, 卜海燕, 朱剑霄 (2020). 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术. 科技导报, 38(17), 66-80.]
- He NP, Yu Q, Wu L, Wang YS, Han XG (2008). Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of Northern China. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, 2952-2959.
- Humbert JY, Dwyer JM, Andrey A, Arlettaz R (2016). Impacts of nitrogen addition on plant biodiversity in mountain grasslands depend on dose, application duration and climate: a systematic review. *Global Change Biology*, 22, 110-120.
- Jiang Y, Li TP, Feng X, Wang RZ, Zhang YG (2019). Effects of exogenous sulfur input on nutrient availability in soil-plant system of grassland. *Chinese Journal of Ecology*, 38, 1192-1201. [姜勇, 李天鹏, 冯雪, 王汝振, 张玉革 (2019). 外源硫输入对草地土壤-植物系统养分有效性的影响. 生态学杂志, 38, 1192-1201.]
- Korfanta NM, Mobley ML, Burke IC (2015). Fertilizing western rangelands for ungulate conservation: an assessment of benefits and risks. *Wildlife Society Bulletin*, 39, 1-8.
- Lemus RW (2012). Strategies for better management of pasture fertilization. [2024-08-28]. <https://extension.msstate.edu/publications/strategies-for-better-management-pasture-fertilization>.
- Li B, Sun HL, Zeng SD, Pu HX (1980). Discussion on grassland vegetation resources and their utilization direction in Hulunbeier pastoral area. *Natural Resources*, 2(4), 30-36. [李博, 孙鸿良, 曾泗弟, 浦汉昕 (1980). 呼伦贝尔牧区草场植被资源及其利用方向的探讨. 自然资源, 2(4), 30-36.]
- Li SL, Chen YJ, Jia SH, Wang FJ (1993). Study on the water regime of dark chestnut soil and the aboveground biomass forecast of an *Eurolepidium chinense* community. *Chinese Bulletin of Botany*, (S1), 3. [李绍良, 陈有君, 贾树海, 王芳玖 (1993). 羊草草原暗栗钙土的水分状况及植物群落地上生物量预报. 植物学通报, (S1), 3.]
- Li W, Gan X, Jiang Y, Cao F, Lü XT, Ceulemans T, Zhao C (2022). Nitrogen effects on grassland biomass production and biodiversity are stronger than those of phosphorus. *Environmental Pollution*, 309, 119720. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119720.
- Li YH (1988). The divergence and convergence of an *Eurolepidium chinense* steppe and *Stipa grandis* steppe under the grazing influence in Xilin River valley, Inner Mongolia. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica*, 12, 189-196. [李永宏 (1988). 内蒙古锡林河流域羊草草原和大针茅草原在放牧影响下的分异和趋同. 植物生态学与地植物学学报, 12, 189-196.]
- Liu JJ, Liu JH, Cui MM, Chen X, Liu JL, Chen JD, Chen AQ, Xu GH (2022). Investigate the effect of potassium on nodule symbiosis and uncover an HAK/KUP/KT member, GmHAK5, strongly responsive to root nodulation in soybean. *Journal of Plant Biology*, 65, 459-471.
- Liu X, Zhang Y, Han W, Tang A, Shen J, Cui Z, Vitousek P, Erisman JW, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F (2013). Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 494, 459-462.
- Liu ZL, Wang W, Hao DY, Liang CZ (2002). Probes on the degeneration and recovery succession mechanisms of Inner Mongolia steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 16, 84-91. [刘钟龄, 王炜, 郝敦元, 梁存柱 (2002). 内蒙古草原退化与恢复演替机理的探讨. 干旱区资源与环境, 16, 84-91.]
- National Forestry and Grassland Administration (2021). 国务院新闻办就“十四五”林业草原保护发展规划举行发布会. [2024-08-28]. <http://www.forestry.gov.cn/main/5927/20210823/085429109469114.html>. [国家林业和草原局 (2021). The State Council Information Office held a press conference on the "14th Five-Year Plan" forestry and grassland protection and development plan. [2024-08-28]. <http://www.forestry.gov.cn/main/5927/20210823/085429109469114.html>.]
- Niu SL, Jiang GM (2004). The importance of legume in China grassland ecosystem and the advances in physiology and ecology studies. *Chinese Bulletin of Botany*, 21, 9-18. [牛书丽, 蒋高明 (2004). 豆科植物在中国草原生态系统中的地位及其生理生态研究. 植物学通报, 21, 9-18.]
- Pan QM, Xue JG, Tao J, Xu MY, Zhang WH (2018). Current status of grassland degradation and measures for grassland

- restoration in Northern China. *Chinese Science Bulletin*, 63, 1642-1650. [潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩 (2018). 中国北方草原退化现状与恢复技术. 科学通报, 63, 1642-1650.]
- Pan QM, Yang YH, Huang JH (2023). Limiting factors of degraded grassland restoration in China and related basic scientific issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 37, 571-579. [潘庆民, 杨元合, 黄建辉 (2023). 我国退化草原恢复的限制因子及需要解决的基础科学问题. 中国科学基金, 37, 571-579.]
- Peng Y, Yang J, Leitch IJ, Guignard MS, Seabloom EW, Cao D, Zhao F, Li H, Han X, Jiang Y, Leitch AR, Wei CZ (2022). Plant genome size modulates grassland community responses to multi-nutrient additions. *New Phytologist*, 236, 2091-102.
- Peng YF, Chen HYH, Yang YH (2020). Global pattern and drivers of nitrogen saturation threshold of grassland productivity. *Functional Ecology*, 34, 1979-1990.
- Wang DL, Wang L, Xin XP, Li LH, Tang HJ (2020). Systematic restoration for degraded grasslands: concept, mechanisms and approaches. *Scientia Agricultura Sinica*, 53, 2532-2540. [王德利, 王岭, 辛晓平, 李凌浩, 唐华俊 (2020). 退化草地的系统性恢复: 概念、机制与途径. 中国农业科学, 53, 2532-2540.]
- Wang HY, Chang JF, Wang ZW (2020). Responses of community species diversity and productivity to nitrogen and phosphorus addition during restoration of degraded grassland. *Scientia Agricultura Sinica*, 53, 2604-2613. [王洪义, 常继方, 王正文 (2020). 退化草地恢复过程中群落物种多样性及生产力对氮磷养分的响应. 中国农业科学, 53, 2604-2613.]
- Wang J, Wang SS, Qiao XG, Li A, Xue JG, Hasi M, Zhang XY, Huang JH (2016). Influence of nitrogen addition on the primary production in Nei Mongol degraded grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 980-990. [王晶, 王姗姗, 乔鲜果, 李昂, 薛建国, 哈斯木其尔, 张学耀, 黄建辉 (2016). 氮素添加对内蒙古退化草原生产力的短期影响. 植物生态学报, 40, 980-990.]
- Wilkinson S, Lowrey R (1973). Cycling of mineral nutrients in pasture ecosystems. *Chemistry and Biochemistry of Herbage*, 1, 247-351.
- Zhang Y, Lü X, Isbell F, Stevens C, Han X, He N, Zhang G, Yu Q, Huang J, Han X (2014). Rapid plant species loss at high rates and at low frequency of N addition in temperate steppe. *Global Change Biology*, 20, 3520-3529.

特邀编委: 周华坤 责任编辑: 乔鲜果