

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.021

引用格式:唐丽萍,王平,哈里·阿力腾别克,等.免耕补播对新疆伊犁河流域草地生态化学计量特征的影响[J].草地学报,2026,34(6):2184—2195

TANG Li-ping, WANG Ping, HALI-Alitengbieke, et al. Effects of No-Tillage Reseeding on Grassland Stoichiometric Characteristics in the Ili River Basin, Xinjiang[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2184—2195

免耕补播对新疆伊犁河流域草地生态化学计量特征的影响

唐丽萍¹, 王平¹, 哈里·阿力腾别克¹, 于连斌¹, 秦绍尉¹, 李佳龙¹,
史海兰², 纪宝明¹, 张静^{1*}

(1. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083; 2. 伊犁州草原工作站, 新疆 伊宁 835000)

摘要:免耕补播是改良退化草地的重要措施之一。本研究以新疆伊犁河流域三种温性草地为对象,设置免耕补播与自由放牧两种处理。旨在探究短期补播对植物群落、土壤理化性质及生态化学计量特征的影响,并揭示生态系统内稳态响应规律。结果表明,免耕补播显著增加了地上生物量和群落盖度,群落多样性仅在温性草甸草原中显著提升。土壤物理性质的变化因草地类型而异。免耕补播处理后,植物碳含量在三类草地中均显著升高,氮含量和氮磷比均显著下降,土壤有机碳和全氮均显著升高,全磷无显著变化,温性荒漠草原与温性草原土壤碳磷比显著升高,土壤氮磷比仅在温性荒漠草原中显著升高。三类草地植物群落均表现出“绝对稳态”特征。综上,免耕补播通过促进群落恢复和调节土壤养分,显著提升草地生产力。不同草地类型对免耕补播的响应存在差异,为干旱与半干旱区草地生态恢复的“分区分类治理”提供了科学依据和理论支持。

关键词:伊犁河流域;生态化学计量;内稳态;免耕补播;分区分类治理

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2184-12

Effects of No-Tillage Reseeding on Grassland Stoichiometric Characteristics in the Ili River Basin, Xinjiang

TANG Li-ping¹, WANG Ping¹, HALI-Alitengbieke¹, YU Lian-bin¹, QIN Shao-wei¹, LI Jia-long¹,
SHI Hai-lan², JI Bao-ming¹, ZHANG Jing^{1*}

(1. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Grassland Work Station of Yili Prefecture, Yili, Xinjiang 835000, China)

Abstract: No-tillage reseeding is one of the important measures for improving degraded grasslands. This study focused on three types of temperate grasslands in the Ili River Basin of Xinjiang, setting up no-tillage reseeding and free grazing treatments. The aim was to investigate the effects of short-term reseeding treatment on plant communities, soil physicochemical properties, and plant-soil ecological stoichiometric characteristics, as well as to reveal the ecosystem's internal stability response mechanisms. The results showed that no-tillage reseeding significantly increased aboveground biomass and community coverage, with community diversity significantly enhanced only in the temperate meadow steppe. The effects of no-tillage reseeding on soil physical properties varied across the grassland types. Plant carbon content significantly increased across all three grassland types, while nitrogen content significantly decreased, and the nitrogen-to-phosphorus ratio of vegetation significantly decreased. Soil organic carbon and total nitrogen both significantly increased, while total phosphorus showed no significant change. The soil carbon-to-phosphorus ratio in the temperate desert steppe and temper-

收稿日期:2025-12-18;修回日期:2026-01-05

基金项目:第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0403)

作者简介:唐丽萍(2000-),女,汉族,重庆人,硕士,主要从事草地生态研究,E-mail: Peytontlp@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: zhangjing_2019@bjfu.edu.cn

ate grassland significantly increased, and nitrogen-to-phosphorus ratio increased significantly only in temperate desert steppe. Plant communities of all three grassland types exhibited “absolutely steady state” characteristics. In conclusion, no-tillage reseeding significantly enhanced grassland productivity by promoting community restoration and regulating soil nutrients. The responses of different grassland types to no-tillage reseeding vary, providing scientific evidence and theoretical support for the “differentiated zoning management” of grassland ecological restoration in arid and semi-arid regions.

Key words: Ili River Basin; Ecological stoichiometry; Homeostasis; No-Tillage reseeding; Differentiated zoning management

草地作为陆地生态系统的重要组成部分,发挥着多重关键功能,包括维持生态平衡、调节气候、保护生物多样性以及调控水土与碳汇等^[1-2]。中国草地资源丰富,总面积约为3.9亿 hm^2 ,占国土面积的40.9%,其中约88%分布于干旱、半干旱地区^[3-4]。新疆地处我国西北干旱区,是草地资源的重要分布区。其境内的伊犁河谷位于天山山脉西段,是干旱-半干旱区中水热条件优越的典型区域。国土调查数据显示,该区域天然草原面积为3.42万 km^2 ,约占伊犁河谷总面积的61%,是新疆重要的生态屏障与畜牧业基地。但近年来,受超载放牧与气候变化等因素影响,全球范围内草地退化问题日益严重,并引发诸多环境问题,例如生物多样性丧失和土壤固碳能力下降^[5-6],威胁到区域生态安全及草地资源的可持续利用。伊犁河谷的天然草地已出现不同程度的退化^[7],因其地处干旱-半干旱生态过渡带,生态系统对外界干扰敏感性较高,草地生态恢复面临重大挑战^[8]。因此,针对该区域生态特征,探索有效的草地退化治理与生态恢复路径,对于提升干旱半干旱区生态系统稳定性和服务功能具有重要意义。

针对草地退化问题,学者们提出了多种生态修复技术,主要包括自然恢复(如轮牧、围栏封育)和人工干预(如免耕补播、施肥、水分调控等)修复措施^[9-10]。其中,免耕补播凭借对表层土壤扰动小、群落重塑快的优势,逐渐在干旱半干旱地区受到重视。该技术通过补播适宜优质牧草,可加速草地生态系统的自然恢复进程,有效恢复其生态功能并提升土壤质量^[11]。有研究证实,补播能显著提高退化草地地上生物量和土壤养分含量,定向引导植被群落向优演替,有效弥补单一围封效应的滞后性^[12-13]。但草地修复并非简单的物种添加过程,而是深受复杂生态反馈机制的制约,具有显著的生境依赖性^[14]。补播物种与原生植被在有限资源(如水分、有效磷)下的竞争与共存策略仍存在争议。不同草地类型由于初始演替阶段、土壤微生物活性及微气

候环境的显著异质性,导致其对补播干预的响应路径与恢复效率存在差异^[15-16]。所以,需针对不同环境条件选择发芽率和竞争性强的牧草补播^[17],且不同草地类型对补播的响应效率受初始养分库水平影响,存在背景肥力效应。在草地修复中,生产力提升往往伴随养分分配模式的波动,深根系植物可能通过生物泵作用改变土壤微环境,进而引发系统生产力与内稳态之间的权衡^[18]。目前关于免耕补播如何通过植物-土壤系统生态化学计量的改变来驱动群落演替的内在机制仍缺乏系统阐述。尤其在生态脆弱的干旱半干旱过渡地带,对不同草地类型生态响应异质性的探讨尤为缺乏。

生态化学计量学(Ecological Stoichiometry)揭示了生态系统中碳(Carbon, C)、氮(Nitrogen, N)、磷(Phosphorus, P)等关键元素在生物体与环境间的相互作用和比例关系,为生态修复提供了核心理论框架,也是衡量系统养分限制的重要指标^[19-20],广泛应用于草地、森林、湿地等生态系统^[21]。在草地生态系统中,植物和土壤是C, N, P的主要储存库,二者通过养分吸收、凋落物分解和根际反馈等途径实现物质循环与能量流动^[22]。免耕补播能够通过改变地表物种组成,直接影响凋落物和根系分泌物的输入,进而重塑植物与土壤的化学计量耦合特征,改变养分循环与内稳态^[23-24]。根据经典阈值理论,当植物 $\text{N:P} < 14$ 时,植被生长主要受氮限制;而当 $\text{N:P} > 16$ 时,则受磷限制^[25]。在干旱半干旱草地中,氮素通常被认为是制约植被生产力的第一限制因子。补播物种的引入可改变草地养分需求,影响土壤养分有效性和植物吸收效率,缓解养分失衡。但免耕补播对系统养分内稳态的影响不确定,一方面可能促进植物群落生物量增长,提高土壤有机质含量;另一方面可能加剧资源竞争,导致植物与土壤养分比例失衡,尤其是补播与原生物种生长需求冲突时^[26]。内稳态(Homeostasis)指生物体维持体内元素比例稳定的能力,用于衡量植物与土壤对外界扰动的响应与调节能力^[19]。植物叶片碳氮磷内

稳态程度体现其对环境适应性,土壤元素比值变化揭示生态过程可塑性^[22]。C,N,P是植物生长、发育、繁殖必需的营养元素,也是陆地生态系统植物生长的主要限制性资源,在养分循环中起平衡耦合作用^[27]。碳氮比、碳磷比与植物N,P养分利用效率相关,可反映生长速度;氮磷比是N,P限制指示剂,是评价植物生长的重要指标。通常植物内稳态强度高于土壤,二者差异可评估草地系统恢复潜力和阶段^[28-29]。然而,当前生态化学计量研究多集中于单一草地类型或特定植物功能群,缺乏对不同草地类型在特定干扰(如免耕补播)下系统响应的比较^[30]。干旱半干旱地区不同草地类型因初始植被结构和养分状况差异,可能表现出不同的化学计量响应模式和内稳态特征^[26]。因此,系统分析不同草地类型植物-土壤C,N,P计量特征及其耦合内稳态特征,阐明恢复过程中植物与土壤的协同响应机制和限制因子,对揭示生态恢复潜力差异、指导干旱半干旱区草地“分区分类治理”意义重大。

本研究聚焦于伊犁河谷温性荒漠草原(Temperate desert steppe, TDS)、温性草原(Temperate steppe, TS)和温性草甸草原(Temperate meadow steppe, TMS)三类典型退化草地,依据不同草地类型特征设计定制化的免耕补播组合方案,并分别设置自由放牧作为对照处理。通过野外采样和室内分析,系统分析不同草地类型下植物与土壤碳氮磷化学计量比对免耕补播的响应规律,探究三类草地补播的响应是否存在差异以及与初始内稳态的关系。本研究旨在揭示干旱区不同草地类型化学计量特征对人为干预的响应规律,拓展生态化学计量学理论的应用范围,为伊犁河流域草地恢复的“分区分类治理”提供科学依据,指导生产实践。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁哈萨克自治州伊犁河流域,地处天山北麓与伊犁谷地之间(42°14′~44°53′N, 80°09′~84°56′E),海拔在600~2000 m之间。其地势表现为西低东高,东、北、南三面环山,地形地貌独特,使其能接收到内陆西风带来的湿润水汽,呈现出典型的温带大陆性气候特征,年均气温为8~10℃,年降水量为300~600 mm,具备良好的水热匹配条件。该流域草地资源丰富。土壤类型

以黑钙土、棕钙土为主,养分状况较为丰富,但不同区域间差异显著。该地区草地的复杂性和多样性为生态研究和土地利用提供了丰富的素材,同时为草地保护和农业发展提供了宝贵的资源。

1.2 样地设置

本研究于2024年8月在新疆伊犁河流域开展野外调查与采样,研究样地依托于地方政府主导的大规模草原生态修复工程,并获得中央财政林业草原的专项资金支持,具有较高的代表性。研究选取霍城县、察布查尔县与特克斯县的免耕补播(Reseed, R)草地作为研究对象(见表1),并以自由放牧(Graze, G)区域为对照组。三地的具体补播方案分别为:霍城县于2020至2021年实施的草原修复项目覆盖666.7 ha退化草原,补播物种包括扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)27 kg·ha⁻¹、伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)45 kg·ha⁻¹、木地肤(*Bassia prostrata*)30 kg·ha⁻¹;察布查尔县于2023年至2024年实施的草原修复项目覆盖2000 ha草地,补播物种包括紫花苜蓿(*Medicago sativa*)22.5 kg·ha⁻¹、无芒雀麦(*Bromus inermis*)6 kg·ha⁻¹、鸭茅(*Dactylis glomerata*)6 kg·ha⁻¹、早熟禾(*Poa annua*)4.5 kg·ha⁻¹、苇状羊茅(*Festuca arundinacea*)4.5 kg·ha⁻¹;特克斯县在2022年启动了草原修复项目并持续一年,涵盖733.3 ha退化草原生态修复,补播植物包括红豆草(*Onobrychis viciifolia*)37.5 kg·ha⁻¹、老芒麦(*Elymus sibiricus*)15 kg·ha⁻¹、扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)15 kg·ha⁻¹。所有研究样地均采用免耕补播技术,不进行任何后续处理,以确保评估补播植物在自然条件下的生长情况和草地生态系统恢复效果。

1.3 样品采集与处理

在免耕补播区及自由放牧样地中分别随机设置7个1 m×1 m样方,每个样方间隔距离大于5 m,以保证样方数据的独立性,每个草地类型共计14个样方。采用针刺法测定样方植被总盖度和各物种的分盖度。采用计数法记录样方内各物种的个数作为密度,其中每个植物个体为通过种子繁殖生长的独立个体,且每个株数代表一个个体。若样方中存在克隆植物(如通过地下茎或匍匐茎扩展的植物),则视为同一植物体的一部分,不进行重复计数。使用钢卷尺测量每种植被的高度(至少测定5株,取平均值)。调查结束后将样方框内的植被齐地面剪

表1 调查样地基本信息

Table 1 Basic Information of the surveyed plots

地理位置 Geographical position	草地类型 Grassland type	纬度 Latitude	经度 Longitude	平均海拔 Average altitude/ m	年均温度 Average annual temperature/°C	年均降水量 Average annual precipitation/mm
霍城县 Huo Cheng County	温性荒漠草原 Temperate desert steppe	44.04°N	80.99°E	772	10.43	279.60
察布查尔县 Qapqal County	温性草原 Temperate steppe	43.52°N	81.13°E	1297	8.05	347.89
特克斯县 Tekes County	温性草甸草原 Temperate meadow steppe	43.27°N	81.74°E	1503	8.10	296.52

下,装入信封袋中带回实验室。将样品置于65℃烘箱中烘干至恒重后称量记录作为地上生物量(Aboveground biomass, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。称量后的植被样品使用球磨机粉碎,过0.25 mm筛,用于后续植被碳、氮、磷含量的测定。土壤容重(Soil bulk density, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)通过环刀法(容积为100 cm^3),在0~10 cm进行采样,并在105℃下烘干24小时,称量烘干后土壤质量并计算。土壤含水量(Soil moisture content, %)通过将样品置于烘箱(105℃)中烘干至恒重,并进行计算得到。此外,使用直径5 cm土钻在对应的植被样方框内取0~20 cm土样(重复5次),放入对应编号自封袋中,后续风干保存,过0.25 mm筛后用于土壤化学性质的测定。

1.4 指标测定及计算

土壤pH使用电位法测定(HJ/T 166土壤环境监测技术规范)。植物碳(Plant total carbon, PTC)和土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)含量采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定;植物全氮(Plant total nitrogen, PTN)和土壤全氮(Soil total nitrogen, STN)含量采用凯氏定氮法测定;植物全磷(Plant total phosphorus, PTP)和土壤全磷(Soil total phosphorus, STP)含量采用钼锑抗比色法测定。上述指标含量均依据《土壤农化分析(第三版)》等标准方法计算得出。再进一步计算得到植物和土壤的碳氮比(C:N)、碳磷比(C:P)、氮磷比(N:P)。

物种重要值(Importance value, IV)是衡量物种在群落中生态地位的核心指标,Patrick丰富度指数(R)、Shannon-Wiener指数(H')、Pielou均匀度指数(E)和Simpson多样性指数(D)共同表征群落 α 多样性。计算公式如下:

$$\text{重要值}(P_i) = \frac{\text{相对密度} + \text{相对盖度} + \text{相对高度}}{3}$$

$$\text{Patrick指数}(R): R = S$$

$$\text{Shannon-Wiener指数}(H') = -\sum P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielou均匀度指数}(E) = (\sum P_i \ln P_i) / \ln S$$

$$\text{Simpson多样性指数}(D) = 1 - \sum P_i^2$$

式中, S 为样地物种总数; P_i 为某一物种的相对重要值;相对密度为某一植物密度占全部植物密度总和的百分比;相对盖度为某一植物盖度占全部植物盖度总和的百分比;相对高度为某一植物高度占全部植物高度总和的百分比。

内稳态指数(Homeostasis index, H)采用生态化学计量内稳性模型计算^[31]:

$$\lg(y) = \frac{1}{H} \times \lg(x) + \lg(c)$$

式中, y 表示样地中植物地上部分的C,N,P含量及其化学计量比(C:N,C:P和N:P), x 表示对应的土壤中C,N,P含量及其化学计量比, c 为拟合常数。为方便统计,多用斜率 $1/H$ 来衡量内稳性的强弱,上式中 $1/H$ 可表示为 $\lg(x)$ 和 $\lg(y)$ 回归方程的斜率。按照Persson等^[32]的分类,当模型模拟的结果显著时,将 $1/H$ 划分为四个类型: $0 < 1/H < 0.25$ 表示内稳态; $0.25 < 1/H < 0.5$ 表示弱内稳态; $0.5 < 1/H < 0.75$ 表示弱敏感态; $1/H > 0.75$ 表示敏感态。而当模型模拟的结果不显著时($P > 0.05$),则认为存在绝对稳态。

响应比(Response ratio, RR)用于评估补播处理对退化草地的影响,其计算公式为:

$$RR = \frac{M_{\text{reseed}}}{M_{\text{graze}}}$$

其中, M_{reseed} 为补播组的均值, M_{graze} 为自由放牧组的均值。

为了减少数据的非正态性带来的误差,我们对响应比进行对数转换,计算自然对数响应比($\ln RR$),其计算公式为:

$$\ln RR = \ln \left(\frac{M_{\text{reseed}}}{M_{\text{graze}}} \right)$$

对每个响应比 $\ln RR$ 的方差 (v) 进行了计算, 计算公式如下:

$$v = \frac{SD_{\text{reseed}}^2}{n_{\text{reseed}} \times M_{\text{reseed}}^2} + \frac{SD_{\text{graze}}^2}{n_{\text{graze}} \times M_{\text{graze}}^2}$$

其中, SD_{reseed} 和 SD_{graze} 分别表示补播组和对照组的标准差, n_{reseed} 和 n_{graze} 分别表示补播组和对照组的样本量, M_{reseed} 和 M_{graze} 分别为补播组和自由放牧组的均值。方差的倒数被视为每个 $\ln RR$ 的权重因子 w 。

为了获得每个变量的整体效应, 接着计算每个变量的加权平均响应比 ($\ln RR_{++}$), 加权平均响应比的计算公式如下:

$$\ln RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k w_{ij} \ln(RR_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k w_{ij}}$$

其中 i 表示变量, j 表示每个变量下的样本数量, w_{ij} 为每个 $\ln RR$ 的加权因子。

加权平均响应比 ($\ln RR_{++}$) 的标准误差 SE 用于评估其精度, 其计算公式如下:

$$SE_{\ln RR_{++}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k w_{ij}}}$$

通过计算 95% 的置信区间 (CI), 评估补播对每个变量的影响是否显著, 公式如下:

$$95\%CI = \ln RR_{++} \pm 1.96 \times SE_{\ln RR_{++}}$$

如果置信区间包含零, 则说明补播组与对照组之间无显著差异; 如果不包含零, 则认为补播处理对相关变量的影响显著。

1.5 数据处理与分析

从国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn>) 获取 2007—2023 年气象站年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)、年降水量 (mm) 和海拔 (m) 数据集。通过 ArcGIS 10.8 软件进行空间插值处理, 并依据各研究样点的经纬度信息, 提取相应的年均温和年降水量数据。

在统计分析中, 本研究使用 SPSS 27.0 对数据做初步分析, 采用 R 4.4.2 进行数据统计分析, 采用 `car` 包中的 `leveneTest` 函数以均值为中心 (`center="mean"`) 进行 Levene 方差齐性检验。当数据满足方差齐性假设 ($P > 0.05$), 则使用 `stats` 包中 `lm` 函数构建线性模型 (Linear Model) 并进行独立样本 t 检验 (Independent Sample t -test) 以比较免耕补播与自由放牧之间的差异; 若数据不满足方差齐性假设 ($P \leq 0.05$), 则改用 `t.test` 函数 (`var.equal=FALSE`) 执行 Welch 检验, 以校正方差不齐。

2 结果与分析

2.1 免耕补播对植物群落特征和土壤理化性质的影响

在三类典型草地中, 免耕补播处理普遍改善了植被群落与土壤理化特征 (见表 2)。在植被生产力方面, 与自由放牧相比, 地上生物量在三类草地中均显著增加。温性荒漠草原地上生物量的增幅为 81.9% ($P < 0.05$), 温性草原增幅高达 906.3% ($P < 0.001$), 温性草甸草原增幅为 103.5% ($P < 0.001$)。与此同时, 群落盖度在三类草地中均极显著升高 ($P < 0.001$), 温性荒漠草原、温性草原和温性草甸草原的群落盖度增幅分别为 78.4%, 162.7% 和 139.1%。

在群落多样性方面, 免耕补播处理对温性荒漠草原和温性草原的影响不显著, 两者的 Shannon-Wiener 指数与 Simpson 指数在不同管理方式下均无显著差异; 而在温性草甸草原中, 多样性指数显著提高 ($P < 0.001$)。类似地, 温性荒漠草原和温性草原的物种丰富度和 Pielou 均匀度也未发生显著变化, 但在温性草甸草原中均显著增加 ($P < 0.01$), 且对补播处理的响应最为敏感, 其群落结构多样性和均衡性均得到明显改善。

在土壤理化性质方面, 免耕补播处理对不同草地类型酸碱环境的调节作用存在差异。具体而言, 土壤 pH 值在温性荒漠草原 ($P < 0.001$) 和温性草原中均显著下降 ($P < 0.05$), 而在温性草甸草原中则显著升高 ($P < 0.001$)。土壤电导率在温性荒漠草原与温性草甸草原中均显著升高 ($P < 0.001$), 在温性草原中电导率虽有增加, 但未达到显著水平。土壤含水量在三类草地中均未因免耕补播处理而产生显著变化。土壤容重在温性荒漠草原与温性草原中无显著差异, 而在温性草甸草原中则显著降低 ($P < 0.01$)。

2.2 免耕补播对植物群落碳氮磷含量及化学计量比的影响

在不同草地类型和管理措施下, 植物群落的碳、氮、磷含量及其化学计量比均表现出显著响应 (图 1)。具体而言, PTC 在三类草地中均显著上升, 其中温性荒漠草原和温性草甸草原在免耕补播条件下都极显著高于自由放牧 ($P < 0.001$), 温性草原也呈现显著增加 ($P < 0.01$)。PTN 在三类草地中均显著降低 ($P < 0.001$)。PTP 的变化因草地类型而

表 2 不同草地类型对应补播方案下植被群落及土壤物理指标

Table 2 Indicators of plant community and soil physical properties under different reseeding schemes across grassland types

因子 Parameters	温性荒漠草原 TDS				温性草原 TS				温性草甸草原 TMS			
	自由放牧(G)	免耕补播(R)	<i>t</i>	<i>P</i>	自由放牧(G)	免耕补播(R)	<i>t</i>	<i>P</i>	自由放牧(G)	免耕补播(R)	<i>t</i>	<i>P</i>
地上生物量 Aboveground biomass/(g·m ⁻²)	64.01±16.01	116.47±11.07	2.70	0.019	19.39±1.74	195.13±14.22	12.26	<0.001	57.18±4.83	116.37±10.34	5.19	<0.001
总盖度 Coverage/%	30.43±2.57	54.29±1.46	8.07	<0.001	32.14±4.06	83.43±3.06	10.08	<0.001	30.29±2.01	72.43±4.49	8.56	<0.001
香农-威纳指数 Shannon-Wiener index	1.01±0.11	0.97±0.04	-0.35	0.729	0.90±0.05	1.01±0.10	1.02	0.328	0.51±0.02	1.02±0.08	5.89	<0.001
辛普森指数 Simpson index	0.56±0.06	0.52±0.01	-0.61	0.551	0.51±0.02	0.55±0.05	0.83	0.423	0.33±0.01	0.57±0.04	6.25	<0.001
物种丰富度 Species richness	3.57±0.30	3.86±0.26	0.72	0.484	3.29±0.29	3.57±0.30	0.69	0.502	2.00±0.00	3.43±0.30	4.80	0.003
均匀度指数 Pielou evenness index	0.79±0.05	0.73±0.03	-1.11	0.290	0.79±0.05	0.80±0.05	0.12	0.909	0.73±0.02	0.84±0.03	3.28	0.007
土壤 pH 值 Soil pH value	8.94±0.02	8.65±0.04	-6.80	<0.001	8.79±0.01	8.71±0.03	-2.53	0.036	7.14±0.03	7.46±0.05	5.23	<0.001
土壤电导率 Electrical conductivity/(μS·cm ⁻¹)	125.84±3.22	151.4±2.24	6.52	<0.001	65.92±2.97	74.82±6.18	1.30	0.230	221.86±12.84	326.8±13.54	5.62	<0.001
土壤含水量 Soil moisture/%	2.18±0.86	2.60±0.75	0.37	0.721	4.20±0.43	6.10±1.94	0.96	0.368	16.2±1.85	20.16±3.63	0.97	0.359
土壤容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	1.47±0.03	1.43±0.02	-1.11	0.299	1.26±0.02	1.20±0.05	-1.11	0.300	1.00±0.03	0.87±0.02	-3.37	0.009

注:数据为平均值±标准误差(Mean±SE)。P≥0.05表示差异不显著,P<0.05表示差异显著,P<0.001表示极显著差异

Note: The data presented are Mean±standard error (Mean±SE). P≥0.05 indicates no significant difference, P<0.05 indicates a significant difference, and P<0.001 indicates an extremely significant difference

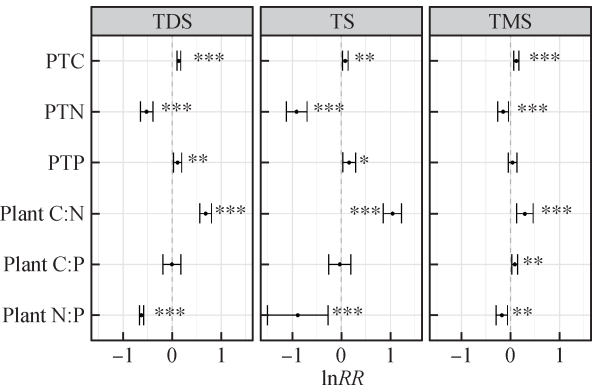


图 1 三类草地植物群落碳、氮、磷含量及化学计量比对免耕补播的响应效应

Fig. 1 Responses of plant C, N, and P contents and

stoichiometric ratios to no-tillage reseeding in three grassland types

注:当 95% 置信区间(CI)不与零效应线(灰色虚线)重叠时,认为免耕补播的效应显著;lnRR 为响应比的自然对数。*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$; ***表示 $P<0.001$ 。下同。TDS, 温性荒漠草原; TS, 温性草原; TMS, 温性草甸草原; PTC, 植物全碳; PTN, 植物全氮; PTP, 植物全磷; Plant C:N, 植物碳氮比; Plant C:P, 植物碳磷比; Plant N:P, 植物氮磷比

Note: When the 95% confidence interval (CI) does not overlap with the zero-effect line (grey dashed line), the effect of no-tillage reseeding is considered significant. lnRR, natural log of the response ratio. * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$; *** indicates $P<0.001$. The same as below. TDS stands for temperate desert steppe; TS stands for temperate steppe; TMS stands for temperate meadow steppe; PTC stands for plant total carbon; PTN stands for plant total nitrogen; PTP stands for plant total phosphorus; Plant C:N stands for plant carbon to nitrogen ratio; Plant C:P stands for plant carbon to phosphorus ratio; Plant N:P stands for plant nitrogen to phosphorus ratio

异,在温性荒漠草原和温性草原中均显著升高($P<0.01$, $P<0.05$),而在温性草甸草原中无显著变化。

在生态化学计量比方面,植物 C:N 在三类草地中均显著升高($P<0.001$)。植物 C:P 在温性荒漠草原与温性草原中无显著差异,但在温性草甸草原中显著升高($P<0.01$)。植物 N:P 在三类草地中均显著下降,其中温性荒漠草原和温性草原在免耕补播条件下较自由放牧都极显著降低($P<0.001$),温性草甸草原也表现为显著下降($P<0.01$)。

2.3 免耕补播对土壤碳氮磷含量及化学计量比的影响

不同草地类型的土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比对免耕补播的响应存在显著差异(图 2)。SOC 在三类草地中均显著增加,其中温性荒漠草原和温性草甸草原的 SOC 在免耕补播处理下显著高于自由放牧($P<0.001$),温性草原的 SOC 亦表现为显著增加($P<0.01$)。STN 在三类草地中均显著升高($P<0.001$)。相较之下,STP 在三类草地中均无显著变化。

在化学计量比方面,土壤 C:N 在三类草地中均未发生显著变化。土壤 C:P 在温性荒漠草原($P<0.001$)和温性草原($P<0.05$)中显著升高,而在温性草甸草原中差异不显著。土壤 N:P 仅在温性荒漠草原中显著升高($P<0.01$),在温性草原和温性草甸草原中变化不显著。

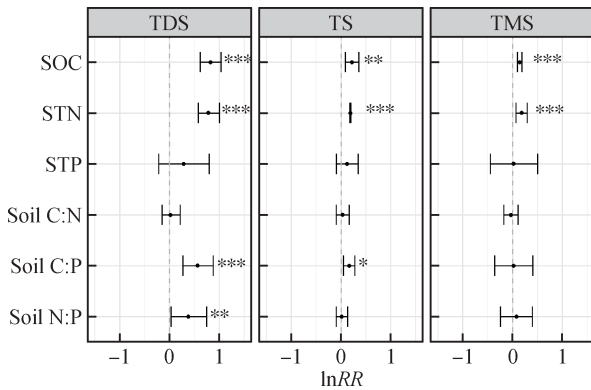


图2 三类草地土壤碳、氮、磷含量及化学计量比对免耕补播的响应效应

Fig. 2 Responses of soil C, N, and P contents and stoichiometric ratios to no-tillage reseeding in three grassland types

注: SOC, 土壤有机碳; STN, 土壤全氮; STP, 土壤全磷; Soil C:N, 土壤碳氮比; Soil C:P, 土壤碳磷比; Soil N:P, 土壤氮磷比

Note: SOC stands for soil organic carbon; STN stands for soil total nitrogen; STP stands for soil total phosphorus; Soil C:N stands for soil carbon to nitrogen ratio; Soil C:P stands for soil carbon to phosphorus ratio; Soil N:P stands for soil nitrogen to phosphorus ratio

2.4 不同草地类型生态系统内稳态对免耕补播的响应

由表3可知,稳态性模型分析结果表明,三种草地类型在对应免耕补播处理下,植物养分碳、氮、磷含量和C:N, C:P, N:P的结果不显著,即植物群落受土壤养分的内稳态变化的影响较小,属于绝对稳态型。

3 讨论

3.1 植被群落特征与土壤理化性质的响应机制

免耕补播作为一种低扰动、可持续的草地恢复措施,能够有效维持地表稳定,打破退化草地稳态,从而促进植被恢复与生产力提升。本研究结果显示,免耕补播显著提高了三类草地的地上生物量和植被盖度,与前人研究一致^[33]。这主要归因于补播所选用的适应性较强的草种,利用其快速生长的生物学特性,迅速占据裸露地表的生态位,通过增加光合面积促进干物质积累^[34]。然而,补播效应表现出显著的生境依赖性。在水热资源与土壤养分背景较优的温性草原和温性草甸草原中,补播植物与原生植物形成了良好的互补效应,恢复效果显著。相比之下,在温性荒漠草原中,尽管生物量有所提升,但由于干旱胁迫的限制,植物生长受到抑制,增长幅度显著低于其他草地类型^[14]。在草地恢复过

程中,混合补播通常有助于增加物种数量,从而提高物种多样性^[27, 35]。在物种多样性方面,本研究发现,免耕补播仅在温性草甸草原中显著提高了Shannon-Wiener指数、Simpson指数、物种丰富度和均匀度,而在温性荒漠草原和温性草原中改善作用不显著,表明补播对群落多样性的影响存在显著的类型依赖性。已有研究指出,补播虽然显著增加了退化草地的生物量,但却导致原有退化草地的多样性或物种数量进一步下降^[36-37]。在温性荒漠草原和温性草原中,水分与养分的双重胁迫限制了新物种的定植成功率,群落仍由少数适应性强的原生优势种主导,呈现出多样性响应滞后特征^[38]。相比之下,温性草甸草原凭借其良好的水热配置与土壤肥力条件,为补播植物的萌发与竞争提供了有力的环境支持,原有的群落生态位被打破,新物种迅速占据了新的生态位,从而显著改善了群落的多样性和结构均衡性^[39-40]。

土壤作为植物生长的基质,其理化性质的变化直接影响植被恢复的进程与效果^[41]。本研究发现,免耕补播对土壤pH值、电导率、容重的影响因草地类型而异。在温性荒漠草原和温性草原中,土壤pH值显著降低,而在温性草甸草原中则显著升高,这可能与补播后根系分泌物组成、有机酸积累及微生物活性变化有关^[42]。具体而言,在温性荒漠草原和温性草原中,干旱半干旱区土壤多呈碱性,补播后根际有机酸等酸性物质累积致土壤酸化,从而导致pH值下降^[43]。温性草甸草原水分条件较好,本底土壤pH值相对较低。补播的豆科和深根系禾本科植物通过生物泵作用,将土壤深层的盐基离子吸收并运输至地表,通过凋落物归还增加了表层土壤的交换性阳离子含量,从而起到提升pH值的作用;此外,高生物量下的氮素同化过程也可能是导致pH值升高的原因。土壤电导率在温性荒漠草原和温性草甸草原中显著上升,反映土壤离子活化和养分再分布过程的加速;温性草原中电导率虽有升高但趋势未达显著水平,可能与补播时间较短、土壤矿化速率较低有关^[44]。此外,温性草甸草原土壤容重的显著下降,证实了高盖度植被通过根系穿插和增加有机质输入,有效改善了土壤团粒结构与孔隙度^[45]。总体而言,免耕补播通过促进地上生物量积累、优化群落结构及调节土壤理化环境,显著增强了草地生态系统的功能。补播的生态效应呈现出明显“分区响应”特征:水热条件优越的温性草甸草

表 3 不同草地类型对应不同免耕补播方案下生态系统内稳态指数

Table 3 Ecosystem homeostasis indices under different no-tillage reseeding schemes in three grassland types

草地类型 Grassland type	变量 Variables		处理 Treatment	1/H	R ²	P	内稳态分类 Homeostatic classification
	x	y					
温性荒漠草原 TDS	SOC	PTC	Graze	0.030	0.144	0.528	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.280	0.687	0.083	绝对稳态 Absolutely steady state
	STN	PTN	Graze	0.135	0.326	0.315	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	1.176	0.181	0.475	绝对稳态 Absolutely steady state
	STP	PTP	Graze	0.013	0.007	0.896	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.130	0.484	0.192	绝对稳态 Absolutely steady state
	Soil C:N	Plant C:N	Graze	0.006	0.002	0.942	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.277	0.051	0.716	绝对稳态 Absolutely steady state
	Soil C:P	Plant C:P	Graze	0.104	0.030	0.779	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.131	0.631	0.109	绝对稳态 Absolutely steady state
	Soil N:P	Plant N:P	Graze	0.165	0.196	0.456	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.372	0.428	0.231	绝对稳态 Absolutely steady state
温性草原 TS	SOC	PTC	Graze	0.064	0.026	0.797	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.619	0.132	0.547	绝对稳态 Absolutely steady state
	STN	PTN	Graze	1.674	0.036	0.760	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	2.723	0.049	0.721	绝对稳态 Absolutely steady state
	STP	PTP	Graze	0.152	0.474	0.199	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.149	0.144	0.528	绝对稳态 Absolutely steady state
	Soil C:N	Plant C:N	Graze	0.593	0.336	0.305	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	3.464	0.029	0.784	绝对稳态 Absolutely steady state
	Soil C:P	Plant C:P	Graze	0.052	0.019	0.824	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.720	0.487	0.190	绝对稳态 Absolutely steady state
	Soil N:P	Plant N:P	Graze	0.341	0.088	0.629	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.678	0.055	0.704	绝对稳态 Absolutely steady state
温性草甸草原 TMS	SOC	PTC	Graze	1.211	0.732	0.064	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.027	0.001	0.962	绝对稳态 Absolutely steady state
	STN	PTN	Graze	0.208	0.049	0.721	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.381	0.126	0.558	绝对稳态 Absolutely steady state
	STP	PTP	Graze	0.188	0.387	0.263	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.141	0.244	0.398	绝对稳态 Absolutely steady state
	Soil C:N	Plant C:N	Graze	0.089	0.005	0.913	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.283	0.077	0.650	绝对稳态 Absolutely steady state
	Soil C:P	Plant C:P	Graze	0.060	0.018	0.830	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.227	0.484	0.192	绝对稳态 Absolutely steady state
	Soil N:P	Plant N:P	Graze	0.147	0.169	0.492	绝对稳态 Absolutely steady state
			Reseed	0.006	0.001	0.971	绝对稳态 Absolutely steady state

注: SOC, 土壤有机碳; STN, 土壤全氮; STP, 土壤全磷; Soil C:N, 土壤碳氮比; Soil C:P, 土壤碳磷比; Soil N:P, 土壤氮磷比; PTC, 植物全碳; PTN, 植物全氮; PTP, 植物全磷; Plant C:N, 植物碳氮比; Plant C:P, 植物碳磷比; Plant N:P, 植物氮磷比

Note: SOC represents soil organic carbon; STN represents soil total nitrogen; STP represents soil total phosphorus; Soil C:N represents soil carbon to nitrogen ratio; Soil C:P represents soil carbon to phosphorus ratio; Soil N:P represents soil nitrogen to phosphorus ratio; PTC represents plant total carbon; PTN represents plant total nitrogen; PTP represents plant total phosphorus; Plant C:N represents plant carbon to nitrogen ratio; Plant C:P represents plant carbon to phosphorus ratio; Plant N:P represents plant nitrogen to phosphorus ratio

原恢复响应最为显著,而受环境胁迫较强的温性荒漠草原恢复进程相对缓慢。

3.2 植被碳、氮、磷含量及生态化学计量比的响应机制

植物碳氮磷比反映植物的生长速率和养分利用效率^[46]。本研究结果表明,免耕补播显著改变了草地植物群落的养分化学计量格局。三类草地

PTC在补播后显著提升,与Lu等^[13]的研究结果一致,表明补播植物具有较强的碳固定能力,进而增强草地生态系统的碳输入。PTN在补播后普遍显著下降,呈现典型的氮稀释效应,即植被快速的生物量增长和碳积累速率超过了氮的吸收和同化速率^[31]。PTP的响应则存在类型差异。在温性荒漠草原和温性草原中PTP在补播后显著升高,这可能得益于补播植物(尤其是菊科和豆科)通过分泌有

机酸和磷酸酶活化土壤磷,提高了磷的生物有效性^[47]。而在水热和养分条件优越的温性草甸草原中,PTP无显著变化,表明土壤磷供应充足,以满足植被快速生长所需的磷,表现出磷供应的背景效应。在生态化学计量关系方面,三类草地植物C:N在补播后均显著升高,与Yuan等^[48]研究结果一致,进一步印证了碳积累相对于氮吸收的领先地位。植物N:P普遍下降,所有样地植被N:P均 <14 ,根据Koerselman等^[25]提出的阈值判断,该区域草地生态系统在补播后植物仍普遍受到氮限制。补播后植物C:P在温性草甸草原中显著升高,而在另外两类草地中变化不显著,表明在高生产力条件下温性草甸草原的碳固定速率显著高于磷同化速率,可能存在磷相关的稀释效应^[49]。总体来看,免耕补播通过改变植物功能群组成及其养分吸收策略,强化了群落的碳积累,但氮限制主导的养分吸收响应受到草地类型及其环境背景的综合调控。

3.3 土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量比的响应机制

土壤是草地生态系统物质循环的核心,其碳、氮、磷含量及其计量关系反映了养分的积累与转化状态^[50]。本研究结果表明,免耕补播显著提升了三类草地的土壤有机碳和全氮含量,在区域尺度上表现出良好普适性。这主要源于补播通过提升植被生产力,增加了根系分泌物、枯落物与有机质输入^[51],同时减缓了土壤侵蚀过程,从而提升了土壤碳和氮的积累。其中,温性荒漠草原的SOC增幅最为显著,这反映了该生态系统初始碳储量较低,在植被恢复后具有更大的固碳潜力,且在植被恢复后碳积累速率较快^[52]。与碳氮的显著累积不同,STP在三类草地中均无显著变化,说明短期内补播对土壤磷库影响较为有限^[53]。土壤磷主要来源于母质风化和有机质矿化,其生物地球化学过程受水分、pH值及地质背景的严格制约^[47]。在干旱-半干旱区,水分匮乏进一步抑制磷的矿化^[54];尽管温性荒漠草原中补播伊犁绢蒿等菊科植物可能通过根际分泌有机酸促进了磷的形态转化,但这一过程仅改变了磷的存在形式而非磷含量^[55]。对于背景肥力较高的温性草甸草原,补播效应则被“背景肥力效应”所掩盖^[56]。在生态化学计量关系方面,土壤C:N在三类草地中保持相对稳定,表明碳与氮在积累过程中具有良好的耦合同步性^[57]。然而,土壤C:P在

温性荒漠草原和温性草原中显著升高,表明碳的积累速度超过了磷的积累速度。由于磷的矿化速率较慢及其生物有效性受限,磷的积累未能与碳同步,从而导致土壤中磷的相对浓度未发生显著变化。本研究中,土壤N:P变化范围在0.35~6.83之间,表明土壤系统处于氮限制^[58],这与我国干旱-半干旱地区植被生长受氮限制的规律一致^[59]。相反,在温性草甸草原中,土壤C:P和N:P未发生显著变化,这得益于其较高的基础肥力与活跃的养分循环^[49]。补播植物促进生物量增长的同时,可能也提高了有机质分解与磷释放速率,从而维持了元素平衡供应^[55]。上述结果进一步支持了“分区分类治理”的理念:对于温性草甸草原,管理可侧重于维持其高效的养分循环;对于温性荒漠草原和温性草原,则应关注持续的氮限制。

3.4 不同草地类型生态系统内稳态对免耕补播响应的调控机制

植物通过调节碳氮磷的摄入比例来维持体内化学组成以及生理代谢状态的相对稳定,这一过程称为内稳态调节^[32]。生态化学计量内稳态反映了生态系统维持内部元素平衡的能力^[31]。本研究发现在短期免耕补播处理下,三类草地的植物-土壤系统在补播后均维持了“绝对稳态”(所有回归模型 $P>0.05$),表明土壤养分变化对内稳态的影响较弱,且植物表现出良好的环境适应能力。尽管观察到一定的变化趋势,但有研究指出,拟合优度较低的指标内稳态指数无法从统计学角度证明补播对内稳态具有显著影响^[32]。此外,内稳态指数为负值的现象与以往研究结果一致^[60-61]。通常以内稳性指数 H 的绝对值来对比分析免耕补播对系统内稳性强弱的潜在影响,揭示了免耕补播在提升生产力与维持稳态性之间存在权衡^[62]。植物的内稳性指数越高,表明其稳态调控能力越强,受外源养分波动影响越小^[18]。由于短期免耕补播未能显著影响不同草地类型的内稳态,未来需要进行长期监测和控制实验,以揭示其稳态变化特征。不同草地类型的生态系统可能需要针对性的管理策略,以保障其长期稳定性和内稳态调控能力。

4 结论

本研究发现,免耕补播显著提升了三类草地的

地上生物量和植被盖度,在水热条件较好的区域效果更佳。生态化学计量结果表明,氮是植被生长的主要限制因子,适当补充氮肥有助于草地恢复。土壤有机碳和全氮含量均显著提升。由于短期补播,植物-土壤系统维持“绝对稳态”。综上所述,本研究为该区域草地生态恢复实行“分区分类治理”提供了科学依据。但受限于一年观测周期,尚未充分揭示凋落物分解、土壤微生物群落演替等长期生态过程的影响。因此,未来研究需延长实验周期,进一步观察该处理对草地生态系统的影响。

参考文献

- [1] BARDGETT R D, BULLOCK J M, LAVOREL S, et al. Combatting global grassland degradation [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10):720-735
- [2] CARLIER L, ROTAR I, VLAHOVA M, et al. Importance and functions of grasslands [J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2009, 37(1):25-30
- [3] 白永飞,赵玉金,王扬,等. 中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6):675-689
- BAI Y F, ZHAO Y J, WANG Y, et al. Assessment of ecosystem services and ecological regionalization of grasslands support establishment of ecological security barriers in northern China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(6):675-689
- [4] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司,全国畜牧兽医总站. 中国草地资源[M]. 北京:中国科学技术出版社,1996:397-489
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National General Station of Animal and Veterinary Service. *Grassland resources of China* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996:397-489
- [5] LARK T J, SPAWN S A, BOUGIE M, et al. Cropland expansion in the United States produces marginal yields at high costs to wildlife [J]. *Nature Communications*, 2020, 11:4295
- [6] WEN L, DONG S K, LI Y Y, et al. The impact of land degradation on the C pools in Alpine grasslands of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2013, 368(1):329-340
- [7] 闫俊杰,黄辉,崔东,等. 新疆伊犁河谷草地退化及其对生态服务价值的影响[J]. *生态经济*, 2018, 34(1):191-196
- YAN J J, HUANG H, CUI D, et al. The degradation of grassland and its impact on ecological service value in Ili River valley of Xinjiang [J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(1):191-196
- [8] ZHANG F G, ZENG B, CAO Y, et al. Human activities have markedly altered the pattern and trend of net primary production in the Ili River basin of Northwest China under current climate change [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(14):2585-2595
- [9] 贺金生,卜海燕,胡小文,等. 退化高寒草地的近自然恢复:理论基础与技术途径[J]. *科学通报*, 2020, 65(34):3898-3908
- HE J S, BU H Y, HU X W, et al. Close-to-nature restoration of degraded Alpine grasslands: theoretical basis and technical approach [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(34):3898-3908
- [10] 蒋胜竞,冯天骄,刘国华,等. 草地生态修复技术应用的文献计量分析[J]. *草业科学*, 2020, 37(4):685-702
- JIANG S J, FENG T J, LIU G H, et al. A bibliometric analysis of application of ecological restoration technology [J]. *Practical Science*, 2020, 37(4):685-702
- [11] HU X J, SUN Q C, ZHANG S Z, et al. Effects of no-till seeding and fertilization on vegetation restoration and soil physico-chemical properties in Alpine degraded grazing grasslands [J]. *Agronomy*, 2025, 15(3):578
- [12] GAO Y, ZHANG Y Q, LIU J, et al. Investigating the compensatory effect of legume reseeded on soil organic carbon loss under tillage management in a saline-alkali grassland in the semi-arid region [J]. *Ecological Engineering*, 2025, 210:107441
- [13] LU Q, MA H B, ZHOU Y, et al. Restoration of soil quality of degraded grassland can be accelerated by reseeded in an arid area of Northwest China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:1101295
- [14] MI W T, ZHENG H, CHI Y, et al. Reseeding inhibits grassland vegetation degradation-Global evidence [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 374:109144
- [15] CHEN L L, SUN J H, TAOGETAO B. Changes in soil organic carbon and nitrogen stocks following revegetation in a semi-arid grassland of North China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 346:118995
- [16] 杨学亭,樊军,盖佳敏,等. 祁连山不同类型草地的土壤理化性质与植被特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4):878-886
- YANG X T, FAN J, GAI J M, et al. Soil physical and chemical properties and vegetation characteristics of different types of grassland in Qilian Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4):878-886
- [17] 阎子盟,张玉娟,潘利,等. 天然草地补播豆科牧草的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(29):1-7
- YAN Z M, ZHANG Y J, PAN L, et al. Research progress of reseeded forage legumes into natural grassland [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(29):1-7
- [18] YU Q, ELSER J J, HE N P, et al. Stoichiometric homeostasis of vascular plants in the Inner Mongolia grassland [J]. *Oecologia*, 2011, 166(1):1-10
- [19] ELSER J J, DOBBERFUHL D R, MACKAY N A, et al. Organism size, life history, and N:P stoichiometry [J]. *BioScience*, 1996, 46(9):674-684
- [20] NING Z Y, ZHAO X Y, LI Y L, et al. Plant community C:N:P stoichiometry is mediated by soil nutrients and plant functional groups during grassland desertification [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 162:106179
- [21] ZHANG C P, LI Q, FENG R Q, et al. C:N:P stoichiometry of plant-soil-microbe in the secondary succession of zokor-made mounds on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental*

- Research, 2023, 222: 115333
- [22] CHEN X L, CHEN H Y H. Plant mixture balances terrestrial ecosystem C:N:P stoichiometry[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4562
- [23] HASSAN N, LI X F, WANG J Y, et al. Effects of grazing on C:N:P stoichiometry attenuate from soils to plants and insect herbivores in a semi-arid grassland[J]. *Oecologia*, 2021, 195(3): 785-795
- [24] XIAO L, LIU G B, LI P, et al. Ecological stoichiometry of plant-soil-enzyme interactions drives secondary plant succession in the abandoned grasslands of Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2021, 202: 105302
- [25] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450
- [26] XU M P, LI W J, WANG J Y, et al. Soil ecoenzymatic stoichiometry reveals microbial phosphorus limitation after vegetation restoration on the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815: 152918
- [27] 杨增增, 张春平, 董全民, 等. 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响[J]. *草地学报*, 2018, 26(5): 1071-1077
YANG Z Z, ZHANG C P, DONG Q M, et al. Effects of reseed-ing on plant community composition and diversity of moderately degraded Alpine grassland in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(5): 1071-1077
- [28] ZHU X Y, ZHENG J H, AN Y, et al. Grassland ecosystem progress: a review and bibliometric analysis based on research publication over the last three decades[J]. *Agronomy*, 2023, 13(3): 614
- [29] XIAO L, BI Y L, DU S Z, et al. Response of ecological stoichiometry and stoichiometric homeostasis in the plant-litter-soil system to re-vegetation type in arid mining subsidence areas[J]. *Journal of Arid Environments*, 2021, 184: 104298
- [30] 刘姝萱, 安慧, 张馨文, 等. 氮磷添加对荒漠草原植物-凋落物-土壤生态化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(21): 8773-8783
LIU S X, AN H, ZHANG X W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on the ecological stoichiometry of plant-litter-soil in desert grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8773-8783
- [31] STERNER R W, ELSER J J. *Ecological stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere* [M]. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 2002: 1-43
- [32] PERSSON J, FINK P, GOTO A, et al. To be or not to be what you eat: regulation of stoichiometric homeostasis among autotrophs and heterotrophs[J]. *Oikos*, 2010, 119(5): 741-751
- [33] TIAN L H, YANG W, JI-SHI A, et al. Artificial reseed-ing improves multiple ecosystem functions in an Alpine sandy meadow of the eastern Tibetan Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(7): 2052-2060
- [34] 韩建国. *草地学* [M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2007: 8
HAN J G. *Grassland science* [M]. Third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 8
- [35] 吴宛萍, 马红彬, 陆琪, 等. 补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响[J]. *草业科学*, 2020, 37(10): 1959-1969
WU W P, MA H B, LU Q, et al. Effects of supplementary sowing on plant community and soil physical and chemical properties in Ningxia desert steppe[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(10): 1959-1969
- [36] TÖLGYESI C, TÖRÖK P, KUN R, et al. Recovery of species richness lags behind functional recovery in restored grasslands[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(9): 1083-1094
- [37] KINDSCHER K, TIESZEN L L. Floristic and soil organic matter changes after five and thirty-five years of native tallgrass prairie restoration[J]. *Restoration Ecology*, 1998, 6(2): 181-196
- [38] TILMAN D. Niche tradeoffs, neutrality, and community structure: A stochastic theory of resource competition, invasion, and community assembly[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(30): 10854-10861
- [39] ZHANG G F, ZHAO W Z, WANG X F. The importance of facilitation on community assembly disappears under severe drought stress[J]. *Functional Ecology*, 2022, 36(5): 1216-1229
- [40] BHADOURIA R, SRIVASTAVA P, SINGH R, et al. Tree seedling establishment in dry tropics: an urgent need of interaction studies[J]. *Environment Systems and Decisions*, 2017, 37(1): 88-100
- [41] 王彦龙, 马玉寿, 施建军, 等. 黄河源区高寒草甸不同植被生物量及土壤养分状况研究[J]. *草地学报*, 2011, 19(1): 1-6
WANG Y L, MA Y S, SHI J J, et al. Investigation of biomass and soil nutrition of different vegetation type at Alpine meadow in Yellow River headwater area [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(1): 1-6
- [42] PATHAN S I, CECCHERINI M T, SUNSERI F, et al. Rhizosphere as hotspot for plant-soil-microbe Interaction [M]// Carbon and nitrogen cycling in soil. Singapore: Springer Singapore, 2019: 17-43
- [43] 霍倩倩, 宋洋洋, 段震宇, 等. 补播对伊犁天然割草地土壤理化性质及微生物群落结构的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(2): 429-439
HUO Q Q, SONG Y Y, DUAN Z Y, et al. Effects of reseed-ing on soil physicochemical properties and microbial community structure in Yili natural mowing land[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2): 429-439
- [44] DE PAUL OBADE V, LAL R. Using meta-analyses to assess pedo-variability under different land uses and soil management in central Ohio, USA[J]. *Geoderma*, 2014, 232: 56-68
- [45] ZHAO Z X, DAI E F. Vegetation cover dynamics and its constraint effect on ecosystem services on the Qinghai-Tibet Plateau under ecological restoration projects[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 356: 120535
- [46] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics

- of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937-3947
- [47] RICHARDSON A E, BAREA J M, MCNEILL A M, et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1): 305-339
- [48] YUAN Z Y, CHEN H Y H. Decoupling of nitrogen and phosphorus in terrestrial plants associated with global changes[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 465-469
- [49] FORNARA D A, TILMAN D. Soil carbon sequestration in prairie grasslands increased by chronic nitrogen addition [J]. *Ecology*, 2012, 93(9): 2030-2036
- [50] 邓蕾, 刘玉林, 李继伟, 等. 植被恢复的土壤固碳效应: 动态与驱动机制[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 1-10
- DENG L, LIU Y L, LI J W, et al. Effect of vegetation restoration on soil carbon sequestration: Dynamics and its driving mechanisms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 1-10
- [51] SCHRÖDER J J, SCHULTE R P O, CREAMER R E, et al. The elusive role of soil quality in nutrient cycling: a review[J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32(4): 476-486
- [52] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176
- [53] OBERSON A, PYPERS P, BÜNEMANN E K, et al. Management impacts on biological phosphorus cycling in cropped soils[M]//Phosphorus in action: Biological processes in soil phosphorus cycling. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 431-458
- [54] DARYANTO S, WANG L X, JACINTHE P A. Meta-analysis of phosphorus loss from No-till soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(5): 1028-1037
- [55] GAO D C, BAI E, WANG S Y, et al. Three-dimensional mapping of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil microbial biomass and their stoichiometry at the global scale [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(22): 6728-6740
- [56] EL-ESAWI M. Maize germplasm-characterization and genetic approaches for crop improvement [M]. London: IntechOpen, 2017: 67-85
- [57] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252
- [58] 关伟涛, 郑志荣, 刁兆岩, 等. 不同干扰方式下温性草甸草原土壤碳氮磷化学计量特征及其储量研究[J]. *草地学报*, 2022, 30(11): 2959-2966
- GUAN W T, ZHENG Z R, DIAO Z Y, et al. Stoichiometric characteristics and their storage of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the temperate meadow steppe under different disturbances[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 2959-2966
- [59] 陈云, 李玉强, 王旭洋, 等. 中国典型生态脆弱区生态化学计量学研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 4213-4225
- CHEN Y, LI Y Q, WANG X Y, et al. Advances in ecological stoichiometry in typically and ecologically vulnerable regions of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 4213-4225
- [60] 海旭莹, 董凌勃, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8570-8581
- HAI X Y, DONG L B, WANG X Z, et al. Effects of carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry characteristics on plant diversity since returning farmland to grassland on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8570-8581
- [61] XING W, WU H P, SHI Q, et al. Multielement stoichiometry of submerged macrophytes across Yunnan plateau lakes (China) [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10186
- [62] BAI Y F, HAN X G, WU J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland [J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 181-184

(责任编辑 闵芝智)