

DOI: 10.20103/j.stxb.202404100789

宋明华, 霍佳娟, 王贵强, 李以康. 围封与氮素添加对高寒草甸土壤有机碳稳定性的影响. 生态学报, 2025, 45(13): - .
Song M H, Huo J J, Wang G Q, Li Y K. Effects of long-term grazing exclusion and various forms of nitrogen addition on soil organic carbon and their stability in an alpine meadow. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

围封与氮素添加对高寒草甸土壤有机碳稳定性的影响

宋明华^{1,*}, 霍佳娟¹, 王贵强^{2,3}, 李以康³

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 101408

3 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008

摘要: 优化放牧假说提出, 适度放牧能够通过促进土壤养分周转速率, 提高草地生态系统的初级生产力。但是对于适度放牧是否同时有助于土壤有机碳组分的形成与稳定, 目前的认知仍然有限。特别是禁牧后通过外源性养分输入提高土壤有机碳含量并增强碳库的稳定性的研究仍然匮乏。基于在青藏高原矮生嵩草草甸开展了 17 年的围封禁牧和不同化学形态氮素添加的长期实验, 采用物理分级和¹³C 核磁共振技术, 分析了围封禁牧与氮素添加处理下土壤有机碳含量以及矿质结合态和颗粒态有机碳含量、有机碳不同功能团碳含量的变化。研究结果表明长期禁牧降低了 0—10cm 和 10—20cm 土层有机碳含量。围封禁牧提高了 0—10cm 土层颗粒态有机碳含量, 但降低了矿质结合态有机碳含量, 表明禁牧降低了有机碳含量及其稳定性。围封禁牧降低了 0—10cm 土层烷基碳含量, 提高了氧烷基碳含量, 表明有机碳的稳定性降低。不同化学形态氮素长期添加没有改变土壤有机碳含量, 但是铵态氮与硝态氮处理下 0—10cm 土层矿质结合态有机碳含量低于硝酸铵处理, 而铵态氮处理下 0—10cm 土层颗粒态有机碳含量显著高于硝酸铵。另外, 同围封禁牧相比, 铵态氮处理下 0—10cm 土层烷基碳和羧基碳含量降低, 而烷氧碳含量增加, 表明氮素添加, 尤其是铵态氮的长期添加降低了有机碳的稳定性。此外, 0—10cm 土壤有机碳的降低主要源于矿质结合态有机碳的减少, 10—20cm 土层土壤有机碳的变化与颗粒态有机碳显著正相关, 并且土壤 pH 的变化是有机碳组分变化及稳定性降低的主要原因之一。总之, 高寒草地长期禁牧与氮素添加不利于土壤有机碳的截存与稳定。这一结论为退化草地恢复和可持续管理提供了科学依据。

关键词: 围封禁牧; 氮素化学形态; 矿质结合态有机碳; 颗粒态有机碳; ¹³C-核磁共振; 有机碳库稳定性

Effects of long-term grazing exclusion and various forms of nitrogen addition on soil organic carbon and their stability in an alpine meadow

SONG Minghua^{1,*}, HUO Jiajuan¹, WANG Guiqiang^{2,3}, LI Yikang³

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

3 Key laboratory of restoration ecology of cold area in Qinghai Province, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract: The optimal grazing hypothesis posits that moderate herbivore grazing can stimulate grassland productivity by increasing the turnover of soil nutrients and promoting plant compensatory growth. While this paradigm has been well-documented for aboveground biomass, its implications for soil organic carbon (SOC) dynamics—particularly the formation, chemical composition, and long-term stability of SOC—remain inadequately explored. Furthermore, in the context of

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32371664); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0302); 青海省自然科学基金 (2025-ZJ-941M)

收稿日期: 2024-04-10; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songmh@igsrr.ac.cn

widespread anthropogenic nutrient enrichment, it is unclear whether grazing-mediated nutrient turnover or synthetic fertilizer inputs more effectively enhance SOC sequestration and stability in grassland ecosystems. To address these uncertainties, a 17-year in situ experiment was conducted in an alpine meadow on the Tibetan Plateau, a critical carbon sink region sensitive to global change. The study manipulated grazing exclusion (moderate grazing) and nitrogen (N) addition treatments using distinct chemical forms (ammonium-N, nitrate-N, and their mixture) to investigate effects of grazing and fertilization on SOC dynamics. Soil samples from 0—10 cm (surface) and 10—20 cm (subsurface) layers were analyzed for total SOC content, mineral-associated organic carbon (MAOC), and particulate organic carbon (POC)—key indicators of SOC stability. Advanced solid-state ^{13}C nuclear magnetic resonance (^{13}C -NMR) spectroscopy was utilized to characterize molecular-level changes in SOC functional groups, including alkyl-C (recalcitrant compounds), O-alkyl-C (labile carbohydrates), and carbonyl-C (oxidized components). Results demonstrated that prolonged grazing exclusion triggered substantial SOC depletion across both soil layers, with surface soil (0—10 cm) exhibiting a 17.8% reduction compared to winter grazed plots. While grazing exclusion elevated POC in the surface layer by 9.6%, it concurrently decreased MAOC—the mineral-stabilized carbon fraction with longer residence times—by 27.3%, indicating a net decline in both SOC quantity and stability. ^{13}C -NMR analysis revealed that grazing exclusion altered SOC chemistry, reducing alkyl-C (from 24% to 22% of total SOC) while increasing O-alkyl-C (from 46% to 51%) in surface soils. This shifted the alkyl-C/O-alkyl-C ratio—a stability index—from 0.52 to 0.43, confirming SOC destabilization. Long-term N addition did not significantly alter SOC content compared with grazing exclusion. However, N form significantly influenced SOC composition and stability. Ammonium-N (NH_4^+) reduced surface MAOC by 3% relative to nitrate-N (NO_3^-), while increased POC by 5%, suggesting ammonium promoted labile carbon accumulation over mineral-associated stabilization. ^{13}C -NMR data corroborated this: NH_4^+ decreased alkyl-C (11%) and carbonyl-C (10%), while elevated O-alkyl-C (7%) in surface soils, whereas NO_3^- induced milder changes. This divergence likely stems from ammonium's stronger acidification effect (pH decline by 0.42 units under NH_4^+ vs. 0.18 under NO_3^-), which inhibits mineral-organic binding and accelerates decomposition of stabilized carbon. Notably, subsurface SOC (10—20 cm) dynamics showed positive correlations with POC. Mechanistically, ammonium addition acidified soils, pH shifts modulated the organo-mineral associations critical for MAOC formation, explaining SOC variability. The study highlights that anthropogenic N inputs, particularly ammonium-based fertilizers, may inadvertently undermine SOC stability. Our findings suggest that balance grazing intensity with pH-conscious nutrient amendments to optimize both productivity and carbon persistence in alpine ecosystems.

Key Words: grazing exclusion; nitrogen chemical forms; mineral-associated organic carbon; particulate organic carbon; ^{13}C -NMR; soil organic carbon stability

草地在维持大气中 CO_2 浓度平衡和缓解全球气候变化方面发挥重要作用^[1]。然而,人类长期的放牧活动引起土壤有机碳组成及稳定性的显著变化,进而对大气中 CO_2 浓度产生重要影响,并对陆地生态系统产生强烈反馈^[2]。优化放牧假说(optimized grazing hypothesis)认为,中度放牧能够通过促进土壤养分的周转速率提高草地的初级生产力^[3]。然而,我们并不清楚适度放牧是否有利于土壤有机碳的形成与稳定;围封禁牧及围封禁牧后养分的添加是否引起土壤有机碳及其稳定性的变化。

氮素是草地生产力的主要限制因子,氮添加对土壤有机碳截存的影响是复杂的,且存在争议:产生正、中性或负的影响^[4-7]。一种观点认为,尽管氮添加引起土壤有机层碳含量增加,但可溶性有机碳淋溶的损失也较高,因此长期氮素添加可能导致碳截存量的减少^[8-9],另一观点认为,氮素添加改变了土壤微生物群落结构,会显著降低真菌和菌根真菌的数量。同时,添氮使植物根冠比降低,根渗出物和分泌物减少,进而加剧微生物活性受活性碳的限制,可能提高有机碳截存^[10-11]。目前急需开展长期的实验揭示氮素添加对土壤有机碳库及其稳定的影响。

土壤有机碳组成复杂^[12-13]。相较于颗粒态有机碳, 矿质结合态有机碳具有更高的稳定性^[14-16]。另外, ¹³C 核磁共振技术在不破坏土壤有机碳结构基础上, 能够测定出具不同分子结构的有机碳功能团的丰度, 了解有机碳的分解程度, 指示其稳定状态^[17-20]。相比于烷基碳, 烷氧碳的分解程度较低, 稳定性差。一般而言烷基碳与烷氧碳的比值可用于指示土壤有机碳的分解程度^[21]。

基于青藏高原海北高寒草甸生态系统研究站已经开展 17 年的不同化学形态氮素长期输入的实验, 采用团聚体分级测定有机碳组分的量, 结合¹³C 核磁共振技术测定有机碳化学成分, 从有机碳库的物理和化学稳定性揭示其对氮素添加的响应。回答以下科学问题:

- (1) 围封禁牧与不同化学形态氮素长期添加对土壤有机碳组分的影响如何?
- (2) 围封禁牧与氮素添加对土壤有机碳库的稳定性的影响如何?

1 试验地概况

研究地点位于青藏高原东北隅的中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站(简称海北站), 纬度为 37°37' N, 经度为 101°19' E, 海拔约 3200m。该站位于祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷。气候是高原大陆性季风气候, 仅有冷、暖两季之分, 年平均气温-1.7℃, 夏季温暖多雨, 冬季寒冷干燥, 7 月平均气温 9.8℃, 1 月平均气温-14.8℃。年均降水量约 580mm, 植物生长季(5—9 月)集中了全年降水的 80%。海北站建立于 1978 年, 自建站后, 该区域被作为附近少数牧民的冬季放牧草场, 允许牦牛和羊等大型家畜于当年的 11 月份至次年的 4 月份在此区域活动, 牧压强度约为每公顷 1 个羊单位。由于该草地作为冬季牧场, 家畜除了食用植物凋落物外, 主要以储备的饲草料为食。因此, 相比于夏季牧场家畜对活体植物的取食, 冬季牧场家畜取食凋落物对草地的影响较轻。根据每年生长季植被的生长状况和群落物种组成来看, 与轻度放牧下的群落特征相似^[22]。

该地区土壤为高山草甸土、高山灌丛草甸土和沼泽土, 土壤 pH 约为 8 左右, 有机质和全量养分丰富, 但高原较低的温度限制了土壤有机质的分解, 使得土壤中速效及可利用养分较低, 尤其是植物可利用氮素含量匮乏^[22]。因其降水量 80% 分布于植物生长季的 5—9 月, 所以在 6—8 月间, 土壤水分含量较高, 能保证植物的生长需求。矮嵩草草甸植物群落多度较高的植物物种包括矮生嵩草 (*Kobresia humilis*)、羊茅 (*Festuca ovina*)、异针茅 (*Stipa aliena*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、草地早熟禾 (*Poa pratensis*)、苔草 (*Carex scabrostris*)、和鹅绒委陵菜 (*Potentilla nivea*) 等。

2 研究方法

2.1 样地布设和实验设计

自 2005 年, 在海北站选取 60m×80m 均匀一致的草地作为试验样地, 自此样地围封禁牧。采用完全随机化区组设计, 设置 3 个裂区, 每个裂区 10 个样方, 样方大小为 2m×2m, 共 30 个。任何相邻两个样方间隔 1m。30cm 高的铁皮打入样方四周将样方内与样方外植被分割, 地上部分保留 5cm。添加的氮素化学形态是: 铵态氮 (Am)、硝态氮 (Ni)、NH₄NO₃ (AN), 氮素添加剂量是低 (L, 0.375g m⁻² a⁻¹)、中 (M, 1.5g m⁻² a⁻¹)、高 (H, 7.5g m⁻² a⁻¹) 三个氮浓度的正交实验, 共九个处理, 记作 AmL, AmM, AmH, NiL, NiM, NiH, ANL, ANM, ANH, 不添加氮素的为对照 (CK)。每种处理 3 次重复。每年 7 和 8 月初各施肥一次, 每次施肥量是总剂量的 1/2。将相应剂量氮化合物溶于 5L 水中, 用喷壶均匀洒于对应的样方内, 对照只撒施 5L 水。为了对比围封禁牧的作用, 我们在围栏外的冬季放牧草地设置了 5 个 2m×2m 的样方, 每年随机选取 3 个样方作为重复, 同围栏内的养分添加实验处理的样方一同开展植物群落的观测。冬季放牧的处理记作 Gr。

前期实验结果表明, 高剂量的氮素添加引起群落物种组成和地上生物量的显著变化^[23], 因此该实验选取其中三种氮素形态的高浓度和不添加氮素的围封处理, 以及围栏外冬季放牧共五种处理开展本研究。详细的实验布设及样方位置请参见文献^[23]。

2.2 土壤样品采集

2021年8月,在当年施肥及物种调查完成后,齐地面减去植物地上部分,随后利用直径7cm土钻分两层获取土壤样本,即0—10cm,10—20cm。同一样方内按照对角线,在四个顶点和一个中心点取五钻样品,混合均匀,分两部分装入自封袋,一袋用于鲜土-4℃保存,用于后续微生物量碳氮指标测定,一袋风干备用,用于土壤有机碳含量(SOC)、团聚体分级,以及¹³C核磁共振、pH等指标的测定。

2.3 土壤样品测定

将土壤样品在室温下风干,过2mm筛并剔除植物根系和砾石。按顺序称取风干土壤样品,土水比1:4混合,搅拌两分钟后,静置。使用pH计校准后,测试上清液pH值。取铝盒按顺序编号,105℃烘干两小时后,放入干燥器后称重,后称取鲜土重量,放入烘箱105℃烘干48小时后,取出放入干燥器,按顺序称量烘干铝盒和土壤总重量。含水量计算公式:

$$w = \frac{m_0 + m_1 - m_2}{m_0}$$

式中, w 代表含水量, m_0 代表鲜土重量, m_1 代表铝盒干重, m_2 代表干燥土样与铝盒总质量。

土壤过0.25mm筛后,锡杯包样后使用元素分析仪测定土壤全氮含量。取1g左右干土样品,使用0.1M HCl溶液反复洗涤去除土壤中的无机碳,直到没有气泡产生。然后用蒸馏水冲洗土壤样品3—4次,去除所有的HCl残留,烘干后,使用元素分析仪测定土壤有机碳含量。

冷冻保存的鲜土4℃下解冻,后称取10g鲜土于小烧杯中,在密闭且避光的干燥器中氯仿熏蒸培养24小时后,取出转移至塑料瓶中,加入40ml的0.05M K₂SO₄溶液浸提后利用碳氮分析仪测定其TOC和TN值。同时测定为熏蒸土壤浸提液的TOC和TN含量。计算微生物生物量碳、氮。公式如下:

$$\text{MBC(MBN)} = E_c \div 0.45$$

式中,MBC, MBN表示土壤微生物生物量碳,氮(mg/kg);0.45为转换系数; E_c 表示熏蒸土壤TOC(TN)和未熏蒸土壤TOC(TN)的差值。

采用湿筛法^[24]进行团聚体分离并测定每一粒级土壤干重(53—2000μm,小于53μm)。利用重铬酸钾氧化还原滴定法对团聚体样品有机碳含量进行测定。53—2000μm的土壤有机碳为颗粒态有机碳(POC),小于53μm的为矿质结合态有机碳(MAOC)。完成团聚体分离后样品,氢氟酸(HF)处理后利用Avance Neo 600 MHz(Bruker Biospin, Switzerland)仪器,采用¹³C固体核磁共振(¹³C-CPTOSS)方法测定土壤样品化学结构。其中,转速8000Hz,频率为150.9355MHz,采样时间25ms。

2.4 数据处理与分析

在进行统计分析之前,首先要检验数据的正态性和方差齐性。采用独立样本的*t*-test分析轻度放牧与围栏禁牧处理下不同土层土壤有机碳组分、全氮、pH,有机碳功能团,以及土壤微生物量碳、氮的变化。采用One-way ANOVA, Duncan多重比较,分析不同氮素形态添加处理下不同土层土壤有机碳组分、全氮、pH,有机碳功能团,以及土壤微生物量碳、氮的变化,检测不同处理之间变量的差异显著性。采用Pearson相关性分析,检测不同土层土壤有机碳组分,pH,有机碳功能团,以及土壤微生物量碳、氮之间的相关性,统计分析及绘图过程使用软件包括R3.6.2, SPSS。

3 结果与分析

3.1 长期围封禁牧与不同化学形态氮素添加对土壤有机碳、全氮及pH的影响

与对照相比,17年围封禁牧降低了0—10cm土层有机碳含量($P < 0.05$),由冬季放牧下的77mg C/g降低了约18%;围封禁牧也降低了10—20cm土层有机碳含量($P < 0.05$),降幅约15%(图1)。与围封禁牧相比,不同形态氮素添加没有引起0—10cm和10—20cm土层有机碳含量的变化(图1)。围封禁牧降低了0—10cm土层约15%的土壤总氮含量(图1),但是没有引起10—20cm总氮含量的变化(图1)。与围封禁牧相

比,不同形态氮素添加没有引起0—10cm和10—20cm土层总氮含量的变化(图1)。另外,围封禁牧没有引起0—10cm和10—20cm土层土壤pH的变化(图1)。与围封禁牧相比,铵态氮的长期添加显著降低了0—10cm土层pH,而硝态氮和硝酸铵处理下0—10cm土层pH变化不显著(图1);此外,不同形态氮素添加没有引起10—20cm土层pH的变化(图1)。

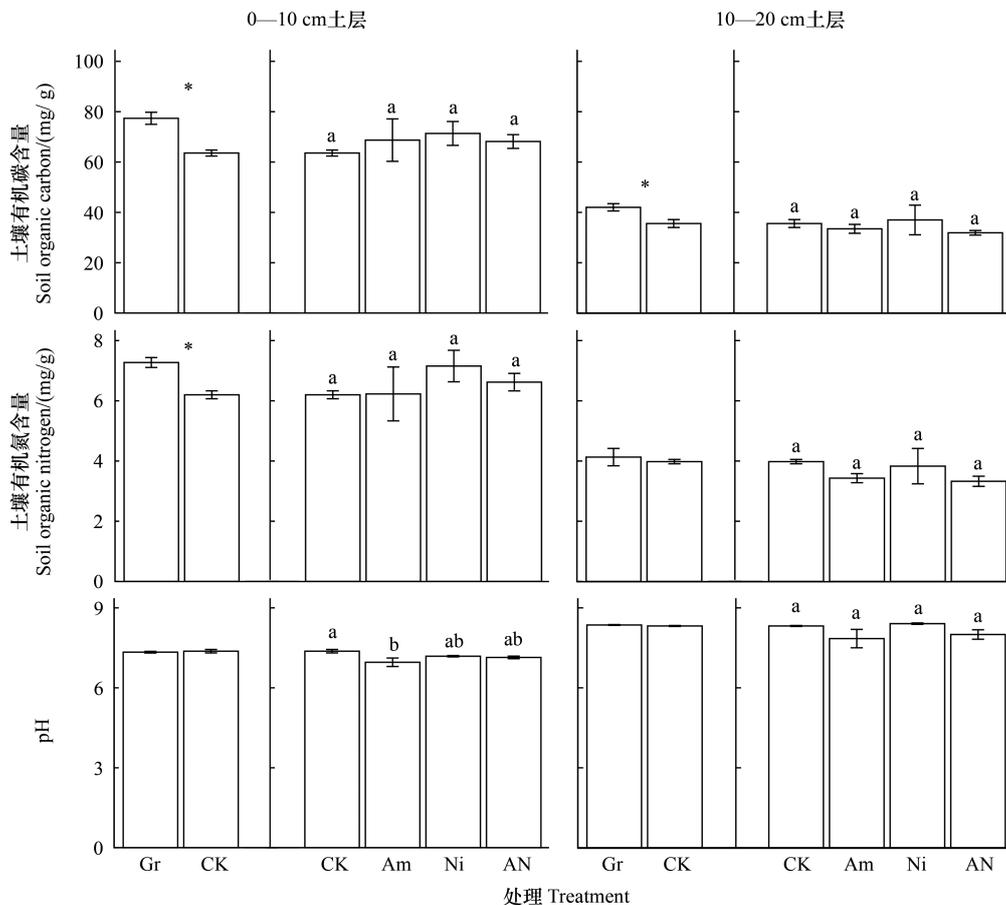


图1 围封禁牧及不同化学形态氮素添加对表层(0—10cm)和深层(10—20cm)土壤有机碳含量、全氮含量、以及pH的影响

Fig.1 Effects of livestock exclusion alone and combined with addition of nitrogen with various chemical forms on soil organic carbon content, soil total nitrogen content and soil pH

图中Gr:冬季放牧,Con:围封禁牧,Am,Ni,AN:分别表示围封后添加 7.50 g N m^{-2} 铵态氮、硝态氮、硝酸铵的处理;*表示围封禁牧的作用是显著的(t -test at $p < 0.05$ level);不同的小写字母表示氮素添加处理之间的作用是显著的($P < 0.05$)

围封禁牧没有改变0—10cm和10—20cm微生物量碳和氮(图2)。与围封禁牧相比,铵态氮添加降低了0—10cm土层微生物量碳,而硝态氮和硝酸铵处理下的作用不显著;氮素添加对10—20cm土层微生物量碳的影响不显著(图2)。与围封禁牧相比,硝酸铵处理降低了0—10cm和10—20cm土层微生物量氮,而铵态氮与硝态氮处理下的作用不显著(图2)。

3.2 长期围封禁牧与不同化学形态氮素添加对矿质结合态和颗粒态有机碳组分的影响

与冬季放牧相比,围封禁牧降低了0—10cm土层矿质结合态有机碳含量(t -test, $P < 0.05$),由冬季放牧下的 35 mg C/g 降至 19 mg C/g ;然而围封禁牧没有引起10—20cm土层矿质结合态有机碳含量的变化(图3)。硝酸铵处理下0—10cm土层矿质结合态有机碳含量显著高于铵态氮与硝态氮处理下的值(图3)。与围封禁牧处理相比,不同形态氮素添加没有引起10—20cm土层矿质结合态有机碳含量的变化(图3)。然而,围封禁牧增加了0—10cm土层土壤颗粒态有机碳含量(t -test, $P < 0.05$),由冬季放牧下的 64 mg C/g 增加至 72 mg C/g 。

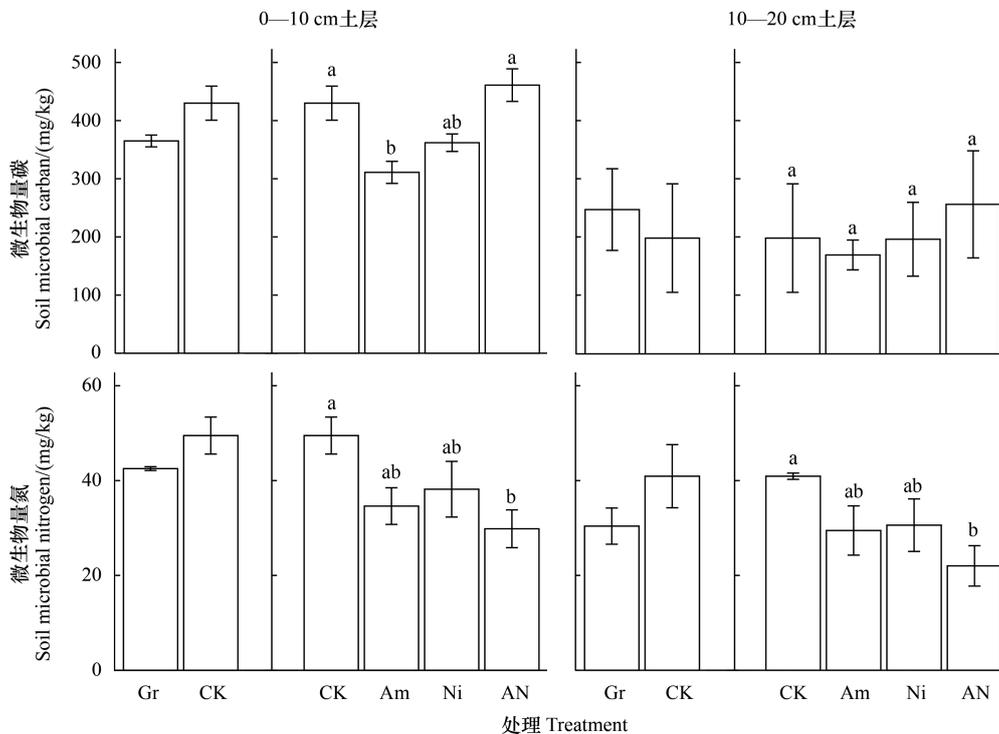


图2 围封禁牧及不同化学形态氮素添加对表层(0—10cm)和深层(10—20cm)土壤微生物量碳、氮含量的影响

Fig.2 Effects of livestock exclusion alone and combined with addition of nitrogen with various chemical forms on soil microbial biomass carbon and nitrogen contents

图中试验处理代码、* 以及小写字母含义如图1

g(图3);此外铵态氮处理下0—10cm 土层土壤颗粒态有机碳含量显著高于硝酸铵处理下的值(图3)。与围封禁牧处理相比,不同形态氮素添加没有引起10—20cm 土层颗粒态有机碳含量的变化(图3)。

3.3 长期围封禁牧与不同化学形态氮素添加对功能团有机碳组分的影响

与冬季放牧处理相比,围封禁牧显著降低了0—10cm 土层有机碳中烷基碳含量,但是显著地增加了氧烷基碳的含量;围封禁牧没有引起芳香族碳和羰基碳含量的变化(图4)。另外,围封禁牧显著降低了10—20cm 土层土壤有机碳中烷基碳含量,但是显著地增加了芳香族碳的含量;围封禁牧没有引起氧烷基碳和羰基碳含量的变化(图4)。与围封禁牧相比,铵态氮的添加显著地降低了0—10cm 土层有机碳中烷基碳和羰基碳含量,增加了氧烷基碳的含量;不同形态氮素添加没有引起芳香族碳含量的变化(图4)。此外,铵态氮的添加降低了10—20cm 土层有机碳中烷基碳含量,增加了氧烷基碳的含量;不同形态氮素添加没有引起芳香族碳和羰基碳含量的变化(图4)。

3.4 长期围封禁牧与不同化学形态氮素添加处理下土壤有机碳、有机碳组分之间的关系

0—10cm 土层,土壤有机碳含量同矿质结合态有机碳含量和氧烷基碳含量呈现出接近显著的正相关($P < 0.1$),而与烷基碳呈显著负相关(图5)。0—10cm 土层中矿质结合态有机碳含量与土壤 pH 呈现接近显著的正相关($P < 0.1$)。0—10cm 烷基碳含量与颗粒态碳含量呈显著负相关,芳香族碳含量与羰基碳含量同氧烷基碳含量呈现显著负相关(图5)。10—20cm 土层土壤有机碳含量同颗粒态有机碳含量显著正相关,同芳香族碳含量呈现显著负相关(图5)。10—20cm 土层烷基碳含量与 pH 呈现接近显著的正相关($P < 0.1$)。10—20cm 烷基碳含量与颗粒态碳含量呈显著正相关,而芳香族碳含量与颗粒态碳含量呈显著负相关(图5)。氧烷基碳含量与烷基碳和羰基碳含量呈现显著负相关(图5)。

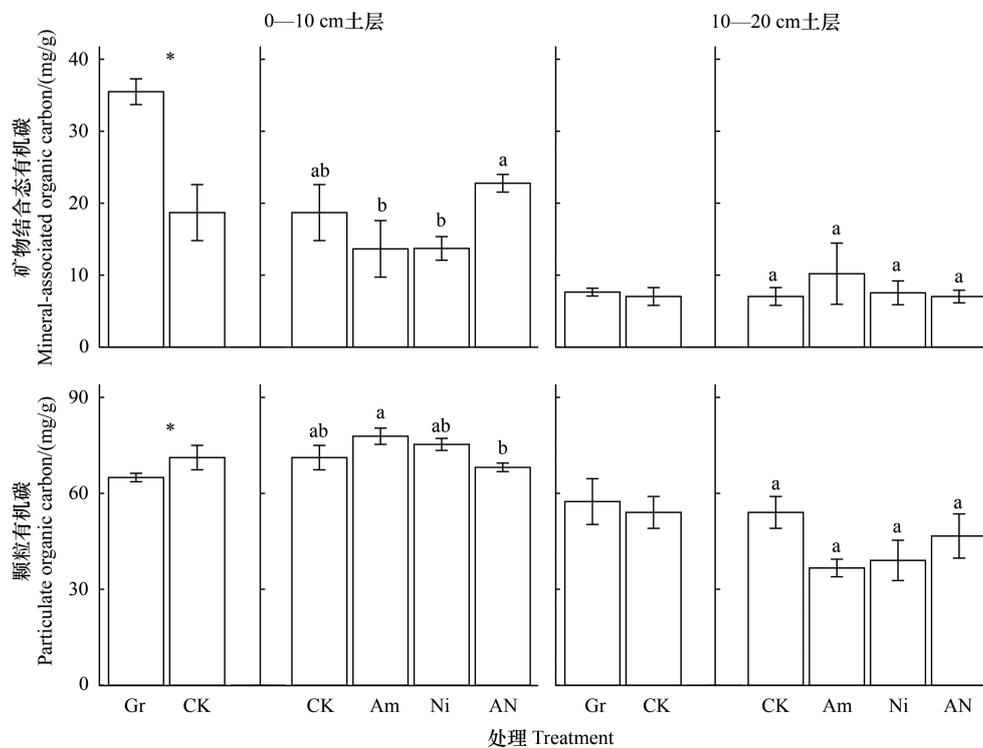


图3 围封禁牧及不同化学形态氮素添加对表层(0—10cm)和深层(10—20cm)矿质结合态和颗粒态有机碳含量的影响

Fig.3 Effects of livestock exclusion alone and combined with addition of nitrogen with various chemical forms on mineral associated soil organic carbon content and particulate soil organic carbon content

图中试验处理代码、* 以及小写字母含义如图1

4 讨论

4.1 放牧活动对草地土壤有机碳的影响

目前全球 60% 的草地处于不同程度的退化状态,直接危及草地土壤碳库功能^[25-27]。有研究表明放牧对生态系统的影响依赖于放牧强度、放牧方式、家畜类型、草地类型及气候等,适度放牧对草地生态系统产生有益作用^[28-30]。优化放牧假说提出保持适宜的放牧强度能够维持草地较高的养分周转速率,提高草地初级生产力^[31-32]。从生态和进化意义上看,适度放牧能够在植物—家畜相互作用过程中提高生态系统养分利用率,使养分的周转利用处于一种“平衡”状态,进而促进植物生长、改善草地环境、提高土壤质量、增强土壤水土保持功效,提高草地土壤碳库功能^[32-35]。

对高寒矮高草草甸开展了长达 17 年的围封禁牧实验结果支持了优化放牧假说。高寒草甸禁牧后导致土壤有机碳组分发生了显著变化,矿质结合态有机碳的显著降低是表层土壤有机碳含量下降的主要原因。无论从团聚体的物理保护,还是从有机碳化学成分的稳定性,围封禁牧导致土壤有机碳稳定性的降低。17 年围封禁牧致使草甸群落向退化方向演替,植物凋落物积累在地表,妨碍了种子回归土壤,影响了植物种群的更新^[36]。另外,凋落物的积累也会改变生境的小环境,影响养分的周转。总之,适度放牧既能够维持物种多样性,同时也能够维持较高的草地生产和服务,探寻不同地区草地适宜的牧压强度和放牧方式已经成为草地经营、管理、可持续发展的有效途径。

4.2 氮素添加对草地土壤有机碳的影响

土壤有机碳对氮素输入的类型、剂量和累积时间等因素的响应结果不同。研究发现氮素输入对高寒草地土壤属性的影响因添氮类型而异,硝酸铵对土壤无机氮的促进效应远大于尿素,对 pH 的负向效应同样远大

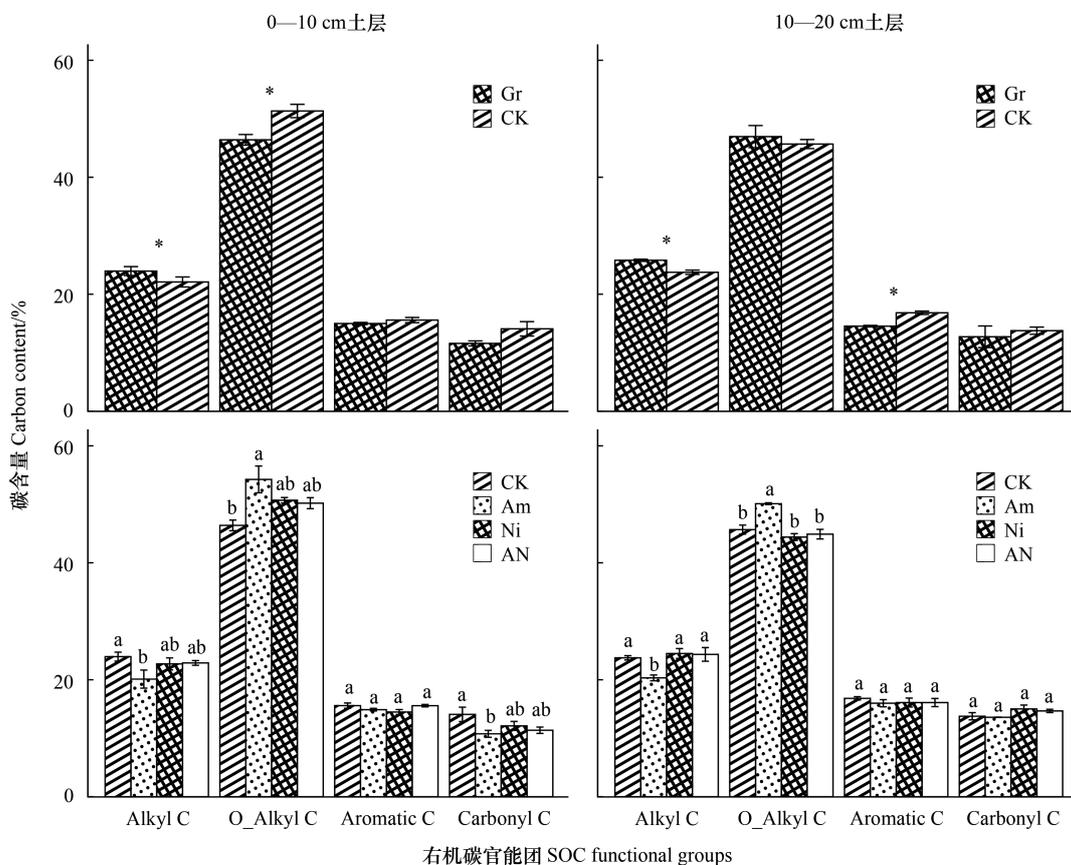


图4 围封禁牧及不同化学形态氮素添加对表层(0—10cm)和深层(10—20cm)土壤有机碳功能团碳含量的影响

Fig.4 Effects of livestock exclusion alone and combined with addition of nitrogen with various chemical forms on soil organic carbon chemical components

图中 Alkyl C 代表烷基碳含量, O-Alkyl C 代表氧烷基碳含量, Aromatic C 代表芳香族化合物的碳含量, Carbonyl C 代表羰基碳含量; 图中试验处理代码、* 以及小写字母含义如图 1

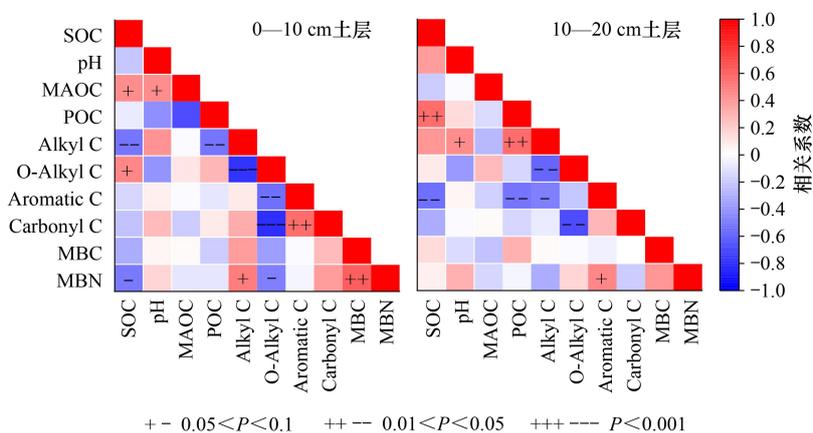


图5 土壤表层(0—10cm)和深层(10—20cm)有机碳含量、pH、有机碳化学成分以及微生物量碳、氮之间的相关关系

Fig.5 Correlations between soil organic carbon, pH, soil organic carbon chemical components and soil microbial biomass carbon and nitrogen contents

图中 SOC 代表土壤有机碳含量, MAOC 代表矿质结合态有机碳含量, POC 代表颗粒态有机碳含量, Alkyl C, O-Alkyl C, Aromatic C, Carbonyl C 含义同图 4, MBC、MBN 分别代表微生物量碳、氮含量; +, - 分别代表正、负相关显著 ($P < 0.05$), ++, -- 分别代表正、负相关极显著 ($P < 0.01$)

于尿素。并且二者对土壤有机碳的影响也存在差异^[37]。另有研究发现,高水平的铵态氮添加对植物根系有促进作用,提高其对土壤碳库的贡献率,而高水平的硝酸铵添加表现为抑制作用^[38]。另外,氮素添加的时间和浓度也是影响土壤有机碳库的重要因素^[39]。对高寒草地进行了为期 2 年的氮素添加试验后,利用 Py-GC/MS 热裂解-气相色谱-质谱联用技术测定不稳定碳组分,结果显示,土壤有机质含量随氮添加量的增加先增加,后减少,添加量超过 160kg N hm⁻² a⁻¹ 后下降减缓^[40]。研究还发现氮诱导的土壤酸化通过降低微生物生长和铁、铝矿物与碳之间的 pH 敏感关系来强烈影响矿质结合态碳,这一机制应该纳入到氮输入情景下预测生态系统碳收支的地球系统模型中^[41]。我们的长期氮素添加试验也证实了不同化学形态氮素添加对有机碳组分和稳定性存在不同影响,长期添氮对矮嵩草草甸土壤有机碳的稳定性不利^[42]。总之,探寻氮输入引起土壤有机碳组成及其稳定性的普遍性作用机制是未来研究需要关注的重点。

4 结论

17 年的围封禁牧与氮素添加试验结果表明,长期禁牧降低了土壤有机碳含量及其稳定性。不同化学形态氮素长期添加没有改变土壤有机碳含量,但引起了有机碳组分和其化学功能团碳含量的变化。另外,同围封禁牧相比,氮素添加尤其是铵态氮的长期添加降低了土壤有机碳的稳定性,并且土壤 pH 的变化是有机碳组分变化及稳定性降低的主要原因之一。

参考文献 (References):

- [1] 方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花. 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 566-576.
- [2] 宋旭昕, 刘同旭. 土壤铁矿物形态转化影响有机碳固定研究进展. 生态学报, 2021, 41(20): 7928-7938.
- [3] 李文建. 放牧优化假说研究述评. 中国草地, 1999, 21(4): 61-66.
- [4] 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏. 氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析. 环境科学, 2023, 44(11): 6226-6234.
- [5] Tian P, Liu S G, Wang Q K, Sun T, Blagodatskaya E. Organic N deposition favours soil C sequestration by decreasing priming effect. *Plant and Soil*, 2019, 445(1): 439-451.
- [6] Schulte-Uebbing L F, Ros G H, de Vries W. Experimental evidence shows minor contribution of nitrogen deposition to global forest carbon sequestration. *Global Change Biology*, 2022, 28(3): 899-917.
- [7] Anwar F, Sanaullah M, Ali H M, Hussain S, Mahmood F, Zahid Z, Shahzad T. Effect of combined application of inorganic nitrogen and phosphorus to an organic-matter poor soil on soil organic matter cycling. *Peer J*, 2024, 12: e17984.
- [8] Bardgett R D, Bowman W D, Kaufmann R, Schmidt S K. A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(11): 634-641.
- [9] De Deyn G B, Van der Putten W H. Linking aboveground and belowground diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(11): 625-633.
- [10] van der Krift T A J, Gioacchini P, Kuikman P J, Berendse F. Effects of high and low fertility plant species on dead root decomposition and nitrogen mineralisation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15): 2115-2124.
- [11] Manning P, Saunders M, Bardgett R D, Bonkowski M, Bradford M A, Ellis R J, Kandeler E, Marhan S, Tschirko D. Direct and indirect effects of nitrogen deposition on litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3): 688-698.
- [12] Krull E S, Baldock J A, Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(2): 207-222.
- [13] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [14] Chen L Y, Fang K, Wei B, Qin S Q, Feng X H, Hu T Y, Ji C J, Yang Y H. Soil carbon persistence governed by plant input and mineral protection at regional and global scales. *Ecology Letters*, 2021, 24(5): 1018-1028.
- [15] Mayes M A, Heal K R, Brandt C C, Phillips J R, Jardine P M. Relation between soil order and sorption of dissolved organic carbon in temperate subsoils. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3): 1027-1037.
- [16] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [17] Baldock J A. Composition and cycling of organic carbon in soil//Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 1-35.
- [18] 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 杨川, 符庆茂, 谭正洪. 土壤有机碳分类与测定方法的研究概述. 热带农业工程, 2021, 45(3): 154-161.

- [19] 李娜, 盛明, 尤孟阳, 韩晓增. 应用 ^{13}C 核磁共振技术研究土壤有机质化学结构进展. 土壤学报, 2019, 56(4): 796-812.
- [20] Witzgall K, Vidal A, Schubert D I, Höschel C, Schweizer S A, Buegger F, Pouteau V, Chenu C, Mueller C W. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4115.
- [21] Lützow M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, Matzner E, Guggenberger G, Marschner B, Flessa H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4): 426-445.
- [22] Luo R Y, Fan J L, Wang W J, Luo J F, Kuzyakov Y, He J S, Chu H Y, Ding W X. Nitrogen and phosphorus enrichment accelerates soil organic carbon loss in alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 303-312.
- [23] Song M H, Guo Y, Yu F H, Zhang X Z, Cao G M, Cornelissen J H C. Shifts in priming partly explain impacts of long-term nitrogen input in different chemical forms on soil organic carbon storage. *Global Change Biology*, 2018, 24(9): 4160-4172.
- [24] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [25] Le Provost G, Schenk N V, Penone C, Thiele J, Westphal C, Allan E, Ayasse M, Blüthgen N, Boeddinghaus R S, Boesing A L, Bolliger R, Busch V, Fischer M, Gossner M M, Hölzel N, Jung K, Kandeler E, Klaus V H, Kleinebecker T, Leimer S, Marhan S, Morris K, Müller S, Neff F, Neyret M, Oelmann Y, Perović D J, Peter S, Prati D, Rillig M C, Saiz H, Schäfer D, Scherer-Lorenzen M, Schloter M, Schöning I, Schrupp M, Steckel J, Steffan-Dewenter I, Tschapka M, Vogt J, Weiner C, Weisser W, Wells K, Werner M, Wilcke W, Manning P. The supply of multiple ecosystem services requires biodiversity across spatial scales. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7: 236-249.
- [26] Olf H, Ritchie M E. Effects of herbivores on grassland plant diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(7): 261-265.
- [27] Guerra C A, Berdugo M, Eldridge D J, Eisenhauer N, Singh B K, Cui H Y, Abades S, Alfaro F D, Bamigboye A R, Bastida F, Blanco-Pastor J L, de Los Ríos A, Durán J, Grebenc T, Illán J G, Liu Y R, Makhalyane T P, Mamet S, Molina-Montenegro M A, Moreno J L, Mukherjee A, Nahberger T U, Peñaloza-Bojacá G F, Plaza C, Picó S, Verma J P, Rey A, Rodríguez A, Tedersoo L, Teixido A L, Torres-Díaz C, Trivedi P, Wang J T, Wang L, Wang J Y, Zaady E, Zhou X B, Zhou X Q, Delgado-Baquerizo M. Global hotspots for soil nature conservation. *Nature*, 2022, 610(7933): 693-698.
- [28] Collins S L, Knapp A K, Riggs J M B, Blair J M, Steinauer E M. Modulation of diversity by grazing and mowing in native tallgrass prairie. *Science*, 1998, 280(5364): 745-747.
- [29] Filazzola A, Brown C, Dettlaff M A, Batbaatar A, Grenke J, Bao T, Peetoom Heida I, Cahill J F Jr. The effects of livestock grazing on biodiversity are multi-trophic: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 2020, 23(8): 1298-1309.
- [30] Wang X Q, Chen R S, Han C T, Yang Y, Liu J F, Liu Z W, Song Y X. Response of frozen ground under climate change in the Qilian Mountains, China. *Quaternary International*, 2019, 523: 10-15.
- [31] McNaughton S J. Stability and diversity of ecological communities. *Nature*, 1978, 274: 251-253.
- [32] de Mazancourt C, Loreau M, Abbadie L. Grazing optimization and nutrient cycling: when do herbivores enhance plant production? *Ecology*, 1998, 79(7): 2242.
- [33] 王舒新. 不同放牧强度下荒漠草原生态系统服务价值评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [34] 王鹏. 黄土高原不同放牧强度生态经济社会系统耦合效应研究[D]. 北京: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2023.
- [35] 杨婧. 放牧对典型草原生态系统服务功能影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [36] Song M H, Yu F H, Ouyang H, Cao G M, Xu X L, Cornelissen J H C. Different inter-annual responses to availability and form of nitrogen explain species coexistence in an alpine meadow community after release from grazing. *Global Change Biology*, 2012, 18(10): 3100-3111.
- [37] Fu G, Shen Z X. Response of alpine soils to nitrogen addition on the Tibetan Plateau: a meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 2017, 114: 99-104.
- [38] 高士杰, 王春梅, 王鹏, 商帅帅, 邱景琮, 李俊清. 多形态多水平氮添加对温带森林土壤根系呼吸和微生物呼吸的影响. *环境化学*, 2020, 39(6): 1568-1577.
- [39] Song C C, Liu D Y, Song Y Y, Mao R. Effect of nitrogen addition on soil organic carbon in freshwater marsh of NorthEast China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(4): 1653-1659.
- [40] Chen Q Y, Niu B, Hu Y L, Wang J, Lei T Z, Xu-Ri, Zhou J Z, Xi C W, Zhang G X. Multilevel nitrogen additions alter chemical composition and turnover of the labile fraction soil organic matter via effects on vegetation and microorganisms. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(4): e2019JG005316.
- [41] Ye C L, Chen D M, Hall S J, Pan S, Yan X B, Bai T S, Guo H, Zhang Y, Bai Y F, Hu S J. Reconciling multiple impacts of nitrogen enrichment on soil carbon: plant, microbial and geochemical controls. *Ecology Letters*, 2018, 21(8): 1162-1173.
- [42] 霍佳娟. 不同形态氮素长期添加下高寒草甸土壤有机碳稳定性机制[D]. 中国科学院地理科学与资源研究所, 2022.