

放牧对青藏高原高寒草地土壤有机碳含量的影响

王灵艳¹, 杜岩功^{2*}, 许庆民³, 王云英², 曲家鹏²

(1. 国家林业和草原局产业发展规划院, 北京 100010; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海西宁 810001; 3. 青海省生态环境监测中心, 青海 西宁 810001)

摘要:【目的】受气候变化和人类活动影响, 青藏高原生态安全屏障仍然面临退化草地面积大、固碳能力降低等生态风险。揭示放牧对青藏高原高寒草地土壤有机碳含量影响及调控因素, 对于提升高寒草地生态屏障功能具有重要作用。【方法】采用Meta分析, 明晰不同放牧强度对青藏高原土壤有机碳含量、理化性质影响的平均效应值, 结合混合效应模型, 揭示放牧对土壤有机碳影响效应的主要调控因素。【结果】放牧干扰极显著降低高寒草地土壤有机碳含量, 降幅约13.93%, 平均效应值 -0.15 ± 0.04 ($P < 0.001$)。轻度、中度和重度放牧草地土壤有机碳降幅分别为12.19%、13.06%和15.63%, 轻度放牧处理未达到显著性检验水平。放牧干扰显著降低高寒草地土壤速效钾、全磷、全氮和全钾含量, 降幅分别为14.55%、10.74%、9.14% ($P < 0.01$) 和3.17% ($P < 0.05$)。放牧显著增加速效氮含量和土壤容重, 增幅分别为11.90%和12.66%。放牧草地土壤有机碳效应值, 主要受土壤速效钾、全氮含量、土壤容重和海拔影响, 均达到显著性检验水平, 效应值变异的解释强度为69.73%。【结论】轻度放牧提高土壤速效钾含量, 有利于降低放牧引起的青藏高原高寒草地碳排放量。

关键词: 青藏高原; 土壤有机碳; Meta分析; 平均效应值; 混合效应模型

中图分类号: S812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2023)03-0021-07

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2023.03.003



青藏高原是我国重要的生态安全屏障, 气候变化尤为剧烈, 使其成为全球变暖背景下环境变化不确定性最大的地区^[1]。高寒草地主要分布在青藏高原, 占高原面积的60.73%, 生态系统脆弱, 受气候变化和长期超载放牧影响, 高寒草地已出现大面积退化现象^[2-3]。

放牧强度是影响草地恢复力和稳定性及家畜生

产力的关键因素, 也是放牧管理的核心^[4]。青藏高原实际载畜量是理论载畜量的1.6倍, 超载放牧县域比例达80.93%^[3]。土壤有机质是草地最重要的养分来源, 95%和50%的土壤全氮与全磷来源于有机质矿化作用, 优质牧草从草地消失, 主要是因为过度放牧利用引起的土壤养分耗竭所致^[5]。放牧通过移除牧草地上部分影响光合作用, 进而影响牧草向土壤的有机碳输入, 同时放牧家畜通过践踏和排泄等影响土壤有机质和速效氮等养分组成^[6]。轻度放牧有助于草原生态系统土壤有机碳库累积, 土壤碳库增加0.78%, 但中度和重度放牧土壤碳库分别降低3.45%和9.91%^[6]。但也有研究发现中度放牧增加若尔盖沼泽湿地土壤有机碳含量^[7]。

轻度和中度放牧能增加生物量和物种多样性, 促进植物群落超补偿生长^[8], 适度放牧是高寒草地最佳的草地管理模式^[9]。重度放牧显著降低草原土壤碳库和氮库储量^[6], 加快了沼泽草甸土壤碳氮磷元素的周

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-09-16

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U21A20186); 中科院西部之光交叉团队项目(E129351214); 青海省重点研发与转化计划项目(2022-NK-135); 青海省昆仑英才“领军人才”项目[青人才字(2021)13号]

作者简介: 王灵艳(1982-), 女, 山东潍坊人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为草地土壤氮素循环及其环境效应研究。E-mail: 276158568@qq.com

*通信作者。E-mail: ygdu@nwipb.cas.cn

转,使土壤养分输出量增加、进而导致土壤肥力下降与草地退化^[8]。过度放牧土壤的总孔隙减少、土壤的容重和渗透阻力增加,因风蚀和水蚀而损失土壤量亦显著增加,降低土壤有机碳库^[10]。重度放牧致使高寒草甸地表植被受到破坏,显著降低土壤碳库功能和降水截留能力^[9]。过去50年,青藏高原暖湿化气候特征明显,气温和降水量每10年分别增加0.3~0.4℃和2.2%^[3],退化高寒草地生物量逐渐增加,提高了土壤有机碳输入量^[8,10],重度放牧增加草地蒸散量,降低水分效率和土壤有机碳含量^[8],但土壤有机碳含量随着降水量的增加、温度的降低呈增加的趋势^[11]。

已有研究主要关注青藏高原东北和西南局部地区高寒草甸土壤有机碳对放牧强度的响应特征,缺少对青藏高原区域高寒草地生态系统土壤有机碳和土壤理化性质对放牧干扰响应特征及主要调控因素的系统定量分析。本研究采用Meta分析,明晰不同放牧强度对青藏高原土壤有机碳含量、理化性质影响的平均效应值,结合混合效应模型,揭示放牧对土壤有机碳影响效应的主要调控因素,为探索因地制宜的草地放牧管理制度提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 Meta分析数据收集

通过中国知网数据库(CNKI),检索关键词“放牧”和“草地”或“草甸”和“土壤有机碳”,总共搜索到180篇论文。按照如下准则进行文章筛选:研究对象为青藏高原高寒草地,表层土壤0~20 cm,试验均在生长季开展,试验设置不同放牧处理。轻度、中度和重度放牧强度,均以收集论文所采用的放牧强度作为依据,分析放牧强度对土壤有机碳等指标的影响效应值。表1的放牧干扰处理包括3种放牧强度的综合效应。本研究收集草地生态系统气象、环境和土壤理化性质指标;气象因素包括年均气温和降水量;环境因素和土壤理化性状包括海拔、土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、铵态氮和硝态氮含量、pH值和容重。原文如果缺少标准误差,采用平均值的1/10为默认值^[5]。

本研究筛选出24篇论文,共包含66组研究数据,研究样点主要分布在西藏自治区、青海省、新疆维吾尔自治区、四川省和甘肃省。对于论文发表的图片数据,采用Web Plot Digitizer软件进行数据提取^[5]。

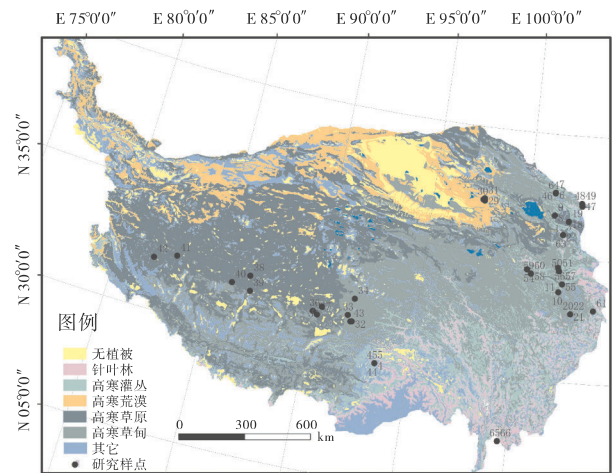


图1 青藏高原高寒草地植被类型和研究样点位置图

Fig. 1 Vegetation types of alpine grasslands and research sites on the Tibetan Plateau

1.2 平均效应值及效应值异质性检验方法

(1) 放牧干扰对单一处理效应值(反应比)^[10-11]的计算公式:

$$\ln R = \ln \frac{x_e}{x_c} = \ln(x_e) - \ln(x_c)$$

式中, $\ln R$ 为效应值, x_c 和 x_e 分别为对照和处理的平均值。

(2) 各处理的研究组内方差采用如下公式进行计算:

$$V_{lnR} = \frac{S_e^2}{N_e x_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c x_c^2}$$

式中: V_{lnR} 为研究组内方差, S_e 和 S_c 分别为处理与对照的标准差; N_e 和 N_c 为处理和对照样本量。

(3) 单一研究结论的权重值确定计算方法:

$$w_i^* = 1/(v_i + \tau^2)$$

式中: v_i 和 τ^2 分别为研究组内方差和研究组间方差。

(4) Meta分析放牧处理效应的平均效应值计算采用随机效应模型方法:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i^* y_i}{\sum_{i=1}^k w_i^*}$$

式中: \bar{y} 为平均效应值, w_i^* 为单一研究的权重, y_i 为单一研究的效应值。

(5) 放牧对青藏高原草地土壤有机碳影响的平均效应值的总体标准误差计算方法:

$$SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i^*}}$$

式中： \bar{y} 为平均效应值， w_i^* 为单一研究的权重， i 和 k 为研究结果 i 到 k 。

(6) 采用标准误差估算放牧处理平均效应值的 95% 置信区间：

$$CI = \bar{y} \pm 1.96 SE$$

式中： CI 表示置信区间， \bar{y} 为平均效应值， SE 为总体标准误差。

(7) 效应值数据的整体异质性检验：

$$Q_i = \sum_{i=1}^k w_i^* (y_i - \bar{y})^2$$

如果数据均质，那么 Q_i 应该服从自由度为 $k-1$ 的卡方分布，不服从时需要引入解释变量。式中， w_i^* 为单一研究的权重， y_i 为单一研究的效应值。

(8) 解释变量的影响程度检验采用混合效应(随机因素和解释变量)模型计算：

$$Q_m = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{n_i} w_i^* (y_{ij} - \bar{y})^2$$

式中： j 和 i 分别代表处理和对照研究； n_i 和 p 表示处理样本量和解释变量异质性检验值； y_{ij} 表示引入解释变量后的单一研究效应值， \bar{y} 为平均效应值。

1.3 数据统计分析

Meta分析基于R语言metafor程序(3.6.1版本)开展。基于随机效应模型(rma程序包)进行单个研究的效应值和平均效应值的计算。当该研究的效应值整体异质性较强时， Q_i 值较高($P < 0.05$)，需要采用混合效应模型(mods程序包)，引入解释变量对异质性进行统计分析。通过漏斗图对称性检验结果，分析本研究的发表偏差性。

2 结果与分析

2.1 放牧对青藏高原高寒草地土壤有机碳含量的影响

放牧极显著降低青藏高原高寒草地土壤有机碳含量，平均效应值为 -0.15 ± 0.04 (95% 置信区间 $-0.23 \sim -0.06$)，降低幅度 13.93% ($P < 0.001$) (表 1)。重度处理平均效应值为 -0.17 ± 0.08 。随着放牧强度增加，土壤有机碳含量平均效应值降低幅度逐渐增加，分别为 12.19%、13.06% 和 15.63%，重度放牧显著高于轻度和中度放牧 ($P < 0.05$)。轻度放牧处理对草地土壤有机碳含量影响的平均效应值未达到显著性检验水平，优先选择轻度放牧制度，减少放牧对土壤有机碳含量的影响。

表 1 放牧干扰及不同放牧强度对高寒草甸土壤有机碳含量影响平均效应值

Table 1 Effect size of grazing activity and intensity on soil organic carbon

放牧强度	平均效应值	95% 置信区间	降低幅度/%	P 值	自由度
放牧干扰	-0.15 ± 0.04	$-0.23 \sim -0.06$	13.93	< 0.001	65
轻度	-0.13 ± 0.09^a	$-0.31 \sim 0.04$	12.19 ^a	0.13	16
中度	-0.14 ± 0.07^a	$-0.27 \sim -0.01$	13.06 ^a	< 0.05	27
重度	-0.17 ± 0.08^b	$-0.33 \sim -0.01$	15.63 ^b	< 0.05	20

注：平均效应值为平均值±标准误差

2.2 放牧对青藏高原高寒草地土壤理化性质的影响

放牧干扰显著降低高寒草地土壤速效钾、全磷、全氮和全钾含量，前三者均达到极显著性检验水平 ($P < 0.01$) (图 2)，后者达到显著性检验水平 ($P < 0.05$)，降低幅度分别为 14.55%、10.74%、9.14% 和 3.17%，其中土壤速效钾含量降低幅度最高。极重度退化黑土滩草地建植人工草地，需要考虑补充速效钾。放牧增加了土壤 pH 值、速效磷、速效氮含量和容重，增幅分别为 0.14%、2.37%、11.90% 和 12.66%，其中放牧

对土壤速效氮含量和容重平均效应值的影响分别达到显著性 ($P < 0.05$) 和极显著性 ($P < 0.05$) 检验水平。容重增加可能会降低高寒草甸水源涵养功能。

2.3 基于混合效应模型揭示土壤有机碳效应值对气候因素和土壤理化性质等连续变量的响应特征

青藏高原放牧草地土壤有机碳效应值主要受土壤速效钾、全氮含量、容重和海拔影响，均达到显著性检验水平 ($P < 0.05$)，效应值变异的解释强度分别为 28.38%、19.17%、15.70% 和 6.48% (表 2)，解释强

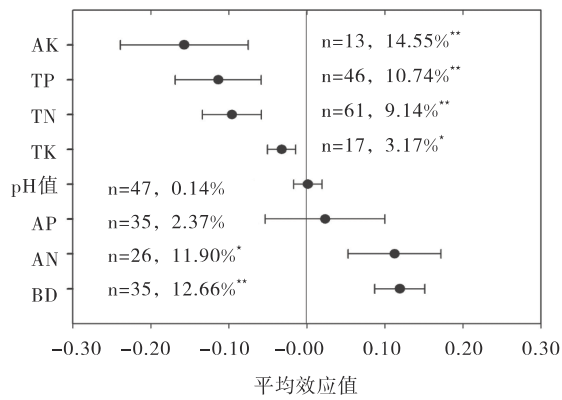


图2 青藏高原高寒草地土壤理化性质对放牧干扰响应的平均效应值

Fig. 2 Effect sizes of grazing on soil physical and chemical characteristic on Tibetan Plateau

注: AK, TP, TN, TK, AP, AN, BD 分别表示速效钾, 全磷, 全氮, 全钾, 速效磷, 速效氮和容重。*, ** 分别表示 $P < 0.05, P < 0.01$

度合计为 69.73%, 同时可能受其他因素共同影响。土壤全钾、速效磷、全磷、速效氮含量、pH 值等理化性质对草地土壤有机碳平均效应值影响作用较小。本研究同时发现气象因子如年均气温和降水量对平均效应值影响均为负效应且作用较弱。随土壤全氮含量增加, 放牧草地土壤有机碳含量降低幅度增高。随着土壤速效钾含量、容重和海拔增加, 放牧对青藏高原高寒草地土壤有机碳含量降低作用减弱。

2.4 漏斗图对称性检验放牧对草地土壤有机碳影响效应值的发表偏好性

Meta 分析数据来源于公开发表的学术论文, 是对

效应值和平均效应值的定量化评价, 该评价结果可能受到论文选择性偏倚的影响。通过对放牧干扰影响草地土壤有机碳含量漏斗图的对称性检验, 发现 P 值远大于 0.05 的显著性检验水平 ($z = -0.0120, P = 0.9904$), 标准误差呈现对称分布特征, 这表明该研究提取数据的漏斗图对称, 因此该研究并无论文发表偏爱性, 结果具备充分可信度。

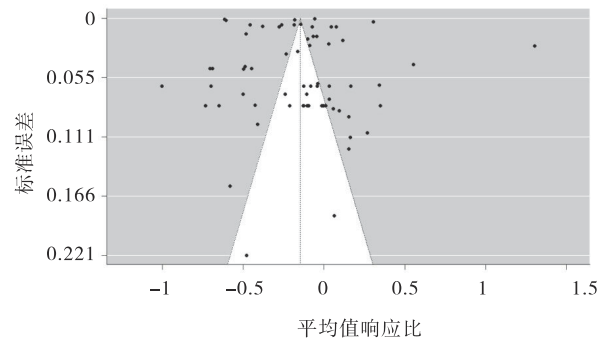


图3 放牧对青藏高原草地土壤有机碳影响的发表偏爱性检验

Figure 3 Eggers regression test for funnel plot asymmetry on effects size of grazing on grassland soils organic carbon on Tibetan Plateau

3 讨论

青藏高原生态系统退化问题依然严重, 草地退化面积比例达 80%, 主要分布在青藏高原西北部^[3]。高寒草甸全量养分丰富, 但速效养分匮乏^[12]。随着放牧利用强度增加, 青藏高原草地禾草科的繁殖受阻、逐渐退化, 耐牧且耐践踏的矮生嵩草 (*Kobresia humilis*) 和高山嵩草 (*K. pygmaea*) 逐渐成为优势植物

表2 土壤有机碳平均效应值对气候和土壤因素响应模型

Table 2 Analysis of air temperature and altitude and other factors on effect size

解释变量	异质性检验 (QM)	P	拟合方程	效应值变异 $R^2 / \%$
速效钾	14.86	$< 0.001^{**}$	$Y = 0.0244 - 0.0009x$	28.38
全氮	13.44	$< 0.001^{**}$	$Y = -0.3795 + 0.0642x$	19.17
容重	5.79	0.016*	$Y = 0.2782 - 0.4690x$	15.70
海拔	5.26	0.022*	$Y = 0.4707 - 0.0002x$	6.48
全钾	2.88	0.090	$Y = -0.4931 + 0.0187x$	3.64
速效磷	1.59	0.208	$Y = -0.2952 + 0.0094x$	1.80
全磷	0.95	0.331	$Y = -0.1810 + 0.0130x$	0.14
速效氮	0.82	0.366	$Y = -0.2605 + 0.0003x$	0.00
pH 值	0.42	0.517	$Y = -0.064 - 0.0216x$	0.00
气温	0.25	0.621	$Y = -0.1444 - 0.0111x$	0.00
降水量	0.0001	0.993	$Y = -0.1455 - 0.0001x$	0.00

种群^[12-13]。

土壤有机碳与土壤肥力密切相关,而且对地球碳循环具有重要影响,既是碳源也是碳汇^[13]。本研究发现放牧干扰极显著降低青藏高原高寒草甸土壤有机碳含量($P < 0.001$)。相似研究发现持续放牧草地土壤有机碳含量明显低于未放牧草地,降幅10.41%~41.69%,土壤有机碳含量与pH值呈现极显著的负相关^[14]。若尔盖湿地高寒草甸退化过程中,轻度退化和重度退化草地土壤有机碳含量分别下降15%和41%,主要因为放牧,土壤含水量显著降低,导致植物功能群分布模式和土壤微生物变化,降低了土壤有机碳输入量^[15]。重度退化高寒草甸土壤有机碳含量下降45.75%,氮素供应不足可能是草地土壤固碳能力下降的主要原因^[9]。玛多县中度和重度放牧紫花针茅草原土壤有机碳含量分别从27.88 g/kg显著降低到10.22和13.87 g/kg^[16]。青海省未退化草地和退化高寒草地土壤有机碳含量分别为34.0和24.0 g/kg,主要受土壤容重影响,随着草地恢复演替,土壤碳密度呈现显著增加趋势^[13]。本研究表明轻度放牧降低土壤有机碳含量但未达到显著性检验水平,中度和重度放牧均达到显著性检验水平。基于草地土壤有机碳管理,建议青藏高原地区采用轻度放牧管理制度。

土壤钾参与植物生长发育60种以上酶系统的活化和碳水化合物的代谢过程,土壤速效钾含量是表征土壤钾素供应状况的重要指标^[17-18]。本研究数据整合分析发现高寒草甸土壤速效钾含量极显著降低,降幅14.55%。青藏高原西南地区高寒草甸土壤速效钾含量降低42.73%^[17]。放牧促使青藏高原东缘高寒草甸土壤速效钾含量降低21.69%^[18]。现有观点多认为青海高原土壤偏弱碱性,土壤速效钾含量丰富^[8,12,18],但本研究和相关研究^[17-18]均发现放牧草地土壤速效钾含量显著降低,这直接降低优势牧草生物量,进而降低植物对土壤有机碳输入量。本研究的混合效应模型结果揭示,高寒草甸土壤有机碳平均效应值主要受土壤速效钾和全氮含量影响(表2)。提升土壤速效钾含量,将显著增加土壤有机碳含量,我们认为草地放牧管理制度,应酌情考虑施用适量钾肥,以便提升高寒草甸土壤肥力和有机碳储量。

氮元素是所有生命体的基本营养物质,是草地植物生长的关键限制因素^[19-20]。本研究发现放牧极显著降低高寒草甸土壤全氮含量,降幅约9.14%。重度放牧显著降低青藏高原高寒草甸土壤全氮含量,轻度和中度放牧草地土壤全氮含量分别为0.83%和0.44%^[21]。重度放牧降低三江源高寒草地土壤全氮含量(36.83%)和氮储量^[22]、改变土壤碳氮比,因土壤生态系统维持碳氮化学剂量稳定性,可能引起土壤有机碳含量的降低。适度放牧内蒙样地土壤全氮含量,从2005年的1.03 g/m²显著提高到2010年的1.83 g/m²^[23]。提适度放牧利于提高氮循环速率及可利用性,氮素有效性增加能够提高地上生物量^[24]。

容重是土壤紧实度的重要指标,与土壤孔隙度、渗透率和水源涵养功能密切相关^[12]。容重可能与高寒草地微生物多样性及草地群落多样性呈现显著正相关^[24-25]。随放牧强度的增加,青藏高原东北缘高寒草甸土壤容重增加^[12,20,24]。本研究发现放牧显著增加高寒草甸土壤容重,增加幅度12.66%。重度放牧极显著增加高寒草地土壤容重,这可能是因为重度放牧引起高寒草甸发生严重退化,植被类群由禾本科莎草科牧草转变为杂类草,地下根系生物量急剧降低,单位体积土壤量增加^[21],土壤有机碳输入过程受到影响,同时可能会增加砾石含量,土壤有机碳保持功能同样降低。同时由于发生水蚀、风蚀,引起表层土壤发生水土流失,深层土壤逐渐裸露,其土壤粘重且存在较多砾石,引起土壤容重增加,同时可能会显著降低青藏高原高寒草地生态系统水源涵养功能^[26]。

随着海拔梯度增加,青藏高原高寒草甸土壤类型和优势物种均发生改变,土壤类型由高山草甸土转变为山地草甸土、高山寒漠土等,土壤厚度和氮磷等养分含量逐渐降低^[20,26]。同时优势植物群落由禾草—矮生嵩草群落向小嵩草群落、杂类草群落转变,高寒草甸生态系统脆弱且受放牧干扰^[3],因此高寒草地土壤有机碳含量显著降低。

4 结论

放牧干扰极显著降低青藏高原高寒草地土壤有机碳含量。随着放牧强度增加,土壤有机碳含量降低

幅度逐渐增加,为了提升高寒草地碳库能力,需要选择轻度放牧制度。放牧干扰显著降低高寒草地土壤速效钾、全磷、全氮和全钾含量。放牧增加了土壤pH值、速效磷、速效氮含量和容重。青藏高原放牧草地土壤有机碳效应值主要受土壤速效钾、全氮含量、容重和海拔影响,年均气温和降水量对平均效应值影响均为负效应且作用较弱。随着土壤速效钾含量、容重和海拔增加,放牧对高寒草地土壤有机碳降低作用可能会减弱。该研究并无论文发表偏爱性,结果具备充分可信度。

参考文献:

- [1] 姚檀栋. 青藏高原水—生态—人类活动考察研究揭示亚洲水塔的失衡及其各种潜在风险[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2761—2762.
- [2] 潘庆民, 孙佳美, 杨元合, 等. 我国草原恢复与保护的问题与对策[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 666—674.
- [3] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 等. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(11): 1298—1306.
- [4] Mipam T D, Wen Y, Yi A, *et al.* Impact of different grazing intensity on soil physical properties and plant biomass in Qinghai—Tibet Plateau alpine meadow ecosystem[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(10): 1975—1980.
- [5] 付娟娟, 益西措姆, 陈浩, 等. 青藏高原高山嵩草草甸优势植物营养成分对放牧的响应[J]. 草业科学, 2013, 30(4): 560—565.
- [6] Zhou G, Zhou X, He Y, *et al.* Hosseimibai. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta—analysis [J]. Global Change Biology, 2017, 23(3): 1167—1179.
- [7] Li Z, Lv P, Wang Y, *et al.* Response of arbuscular mycorrhizal fungal community in soil and roots to grazing differs in a wetland on the Qinghai—Tibet plateau [J]. PeerJ, 2020, 8(6): e9375.
- [8] 贺慧丹, 祝景彬, 未亚西, 等. 牧压梯度下高寒草甸实际蒸散量及植物生产水分有效利用率的研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1488—1493.
- [9] 詹天宇, 侯阁, 刘苗, 等. 青藏高原不同退化梯度高寒草地植被与土壤属性分异特征[J]. 草业科学, 2019, 36(4): 1010—1021.
- [10] 杨青, 何贵永, 孙浩智, 等. 青藏高原高寒草甸土壤理化性质及微生物量对放牧强度的响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(4): 76—81.
- [11] 周国利, 程云湘, 马青青, 等. 牦牛放牧强度对青藏高原东缘高寒草甸群落结构与土壤理化性质的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(4): 1022—1031.
- [12] 杜岩功, 曹广民, 王启兰, 等. 放牧对高寒草甸地表特征和土壤物理性状的影响[J]. 山地学报, 2007, 25(3): 338—343.
- [13] Du Y, Zhou G, Guo X, *et al.* Spatial distribution of grassland soil organic carbon and potential carbon storage on the Qinghai Plateau [J]. Grassland Science, 2019, 65(3): 141—146.
- [14] 李强, 宋彦涛, 周道玮, 等. 围封和放牧对退化盐碱草地土壤碳、氮、磷储量的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(10): 1811—1819.
- [15] 董利军, 李金花, 陈珊, 等. 若尔盖湿地高寒草甸退化过程中土壤有机碳含量变化及成因分析[J]. 植物生态学报, 2021, 45(5): 507—515.
- [16] 王婷, 杨思维, 花蕊, 等. 高寒草原植物功能群组成对退化程度的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2225—2233.
- [17] Man L, Ping L, Li. G Q, *et al.* Grazing rest versus no grazing stimulates soil inorganic N turnover in the alpine grasslands of the Qinghai—Tibet plateau [J]. Catena, 2021, 204: 105382.
- [18] 周华坤, 赵新全, 周立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. 草业学报, 2005, 14(3): 31—40.
- [19] 许庆民, 周赓, 郭小伟, 等. 青藏高原高寒草甸群落特征对氮沉降和增水的响应[J]. 草原与草坪, 2017, 37(5): 8—13.
- [20] 杨思维, 张德罡, 牛钰杰, 等. 高寒草甸表层土壤物理性状对短期放牧的响应[J]. 草原与草坪, 2017, 37(6): 1—8.
- [21] Du Y, Ke X, Guo X, *et al.* Soil and plant community characteristics under long—term continuous grazing of different intensities in an alpine meadow on the Tibetan plateau [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2019, 85: 72—75.
- [22] 范月君, 侯向阳, 石红霄, 等. 封育与放牧对三江源区高寒草甸植物和土壤碳储量的影响[J]. 草原与草坪, 2012, 32(5): 41—46.

- [23] 翟夏杰, 黄顶, 王堃. 围封与放牧对典型草原植被和土壤的影响[J]. 中国草地学报, 2015, 37(6): 73–78.
- [24] 牟晓明, 于应文, 张红梅, 等. 牦牛粪对高寒草甸植被群落特征和生态位参数的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(10): 1594–1601.
- [25] Du Y, Ke X, Dai L, *et al.* Moderate grazing increased alpine meadow soils bacterial abundance and diversity index on the Tibetan Plateau[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(18): 8681–8687.
- [26] Dai L, Guo X, Ke X, *et al.* The variation in soil water retention of alpine shrub meadow under different degrees of degradation on northeastern Qinghai–Tibetan plateau [J]. *Plant and Soil*, 2021, 458(1/2): 231–244.

Effects of grazing on soil organic carbon contents in alpine meadow on Tibetan Plateau

WANG Ling-yan¹, DU Yan-gong^{2*}, XU Qing-min³, WANG Yun-ying², QU Jia-peng²
 (1. Industry Development and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100010, China; 2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810008, China; 3. Qinghai ecological environment monitoring center, Xining 810008, China)

Abstract: [Objective] The ecological security barrier of the Qinghai Tibet Plateau still faces ecological risks such as large degraded grassland area and reduced carbon sequestration capacity, because of climate change and human activities. Revealing the influence and regulation factors of grazing on soil organic carbon content of alpine grassland in Qinghai-Tibet Plateau plays an important role in improving the ecological barrier function of alpine grassland [Method] Meta-analysis was used to clarify the average effect values of different grazing intensities on soil organic carbon content and physicochemical properties on the Qinghai-Tibet Plateau. Combined with the mixed effects model, the main regulatory factors of grazing effects on soil organic carbon were revealed. [Result] This study revealed that grazing disturbance significantly reduced the content of soil organic carbon in alpine grassland approximately 13.93%. Meanwhile, the average effect size was -0.15 ± 0.04 ($P < 0.001$). The decrease of soil organic carbon in light, moderate and heavy grazing grasslands was 12.19%, 13.06% and 15.63% respectively. But the effect of light grazing treatment was insignificant. Grazing disturbance significantly reduced the contents of soil available potassium, total phosphorus, total nitrogen, and total potassium in alpine grasslands by 14.55%, 10.74%, 9.14% ($P < 0.01$) and 3.17% ($P < 0.05$), respectively. Grazing activity significantly increased the content of available nitrogen and bulk density by 11.90% and 12.66% respectively. The effect size of soil organic carbon was mainly driven by soil available potassium, total nitrogen, bulk density, and altitude in grazing grassland ($P < 0.05$). The total explanatory intensity of effect value variation reached 69.73%. [Conclusion] Light grazing and increasing the content of soil available potassium are beneficial to alleviate the effect of grazing on soil carbon content of alpine meadows in the Qinghai Tibet Plateau.

Key words: Tibetan Plateau; soil organic carbon; meta-analysis; effect size; mixed effect model