

# 放牧强度对内蒙古草原土壤微生物多样性和生态系统多功能性影响的Meta分析

姚泽英<sup>1</sup>,张德罡<sup>1\*</sup>,邵新庆<sup>2\*\*</sup>,冶文哥<sup>3</sup>,贾才让东珠<sup>3</sup>

(1. 甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070;2. 中国农业大学草业科学与技术学院,北京 100193;3. 青海省海北州祁连县野牛沟林场边麻管护站,青海 海北 810499)

**摘要:**【目的】探究放牧强度对内蒙古草原土壤微生物多样性和单个生态系统功能指标的影响,综合评估生态系统多功能性(EMF)对放牧强度的响应。【方法】本研究采用Meta分析的方法,对29篇内蒙古草原放牧强度对生态系统多功能性影响的文章进行整合分析。【结果】细菌多样性比真菌多样性对放牧强度的响应更敏感,重度放牧显著降低细菌Shannon—Wiener指数。中度和重度放牧显著降低内蒙古地区草地生态系统多功能性。真菌多样性在调节内蒙古地区草地生态系统多功能性中具有重要作用。【结论】建议在内蒙古草原进行轻度放牧,以促进草地生态系统健康持续发展。

**关键词:**放牧强度;细菌多样性;真菌多样性;生态系统多功能性;内蒙古草原

**中图分类号:**S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)05-0256-09

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2024.05.030



我国草地面积约 $2.83 \times 10^9$  hm<sup>2</sup>,是我国陆地生态系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>,能为人类同时提供初级生产、气候调节、养分循环和生物多样性保护等多重生态系统功能(生态系统多功能性 Ecosystem multifunctionality, EMF)<sup>[2-3]</sup>。土壤微生物是指示土壤生物学性质的重要指标,在调节生物地球化学循环中发挥重要作用,能及时地反映草地生态系统遭受破坏的程度<sup>[4]</sup>。家畜放牧作为我国主要的草地利用方式,不仅影响植物多样性和群落组成,也会通过改变土壤微生物多样性和土壤结构而调节草地生态系统的初级生产和养分循环等生态功能<sup>[5]</sup>。因此,探究土壤微生物多样性和生态系统功能对放牧强度的响应,对于实现草地的健康与可持续管理具有重要意义。

家畜放牧通过采食,践踏和分泌排泄物等方式调控生物多样性和生态系统功能,被认为是草地生态系统功能和过程的重要驱动因素<sup>[6]</sup>。我国约有90%的天然草地由于不合理的放牧强度和草地利用方式导致生产力下降<sup>[7]</sup>、土壤养分流失<sup>[8]</sup>等现象发生,从而给草地生态系统带来不可逆的负面影响。相关研究表明,放牧显著改变了地上植物群落结构和生物量,随着放牧强度的增加,植物物种多样性,优势种地上和地下生物量显著降低,而毒杂草地上生物量显著增加,尤其重度放牧条件下优势种逐渐被毒杂草代替<sup>[9]</sup>。放牧对植物地下部分的影响,一方面通过家畜践踏减少土壤水分及通透性<sup>[10]</sup>,增加土壤紧实度<sup>[11]</sup>,从而加大植物根系生长阻力;另一方面家畜对地上部的采食,通过抑制植物光合作用从而影响光合产物的分配<sup>[12]</sup>,Zuo等<sup>[13]</sup>研究表明放牧对内蒙古科尔沁草原植物根系生物量具有消极影响。放牧强度对土壤养分循环的影响得到诸多研究者关注,并表明过度放牧会降低土壤养分循环能力<sup>[7,14]</sup>,如重度放牧加剧家畜过度采食导致氮素再分配,从而降低土壤氮含量<sup>[15]</sup>。重度放牧也显著降低了呼伦贝尔典型草原总氮含量<sup>[16]</sup>。

收稿日期:2023-02-07;修回日期:2023-03-08

基金资助:国家自然科学基金项目(31971746)

作者简介:姚泽英(1996-),女,河北张家口人,博士研究生。E-mail:yaozey1996@163.com

\*通信作者。E-mail:zhangdg@gsau.edu.cn

\*\*通信作者。E-mail:shaoxinqing@163.com

此外,重度放牧在全球尺度上显著提高土壤碳氮损失程度<sup>[17]</sup>,放牧对土壤铵态氮<sup>[18]</sup>、硝态氮<sup>[19]</sup>和土壤磷含量<sup>[20]</sup>具有不同程度的影响,从而影响草地生态功能的维持。

在探究放牧对生物多样性和生态系统功能关系的影响时,以往研究大多关注植物多样性而对地下生物多样性的了解较少<sup>[21]</sup>。土壤微生物是生态系统中主要的分解者,在调节生态系统功能与过程中发挥着关键的作用<sup>[22]</sup>。生态系统多功能性(EMF)被认为是表征放牧干扰对生态系统影响的重要指标<sup>[23-24]</sup>。越来越多的研究者认为仅考虑单一生态系统功能会低估生物多样性的重要性<sup>[25]</sup>,并且多数研究表明土壤微生物多样性和生态系统多功能性之间存在显著相关关系<sup>[26-27]</sup>,需要更高的多样性来支持多功能性。然而当前研究中生物多样性和生态系统多功能性对放牧的响应还存在不一致性,在荒漠草原,放牧主要通过改变植物多样性而不是微生物多样性降低EMF<sup>[28]</sup>,典型草原微生物多样性在调节放牧对EMF的影响中发挥重要作用<sup>[29]</sup>,此外,放牧直接作用于EMF在半干旱草原<sup>[30]</sup>。内蒙古地区草地资源丰富,是我国北方重要的生态安全屏障,也是我国重要的畜牧业生产基地<sup>[31]</sup>,当前关于放牧干扰如何调控内蒙古地区区域尺度上土壤微生物多样性和生态系统多功能性还不清楚。因此,通过Meta分析方法探究内蒙古草原土壤微生物多样性与生态系统多功能性(EMF)对放牧强度的响应,对于制定适宜的草地管理措施,维持草地生态系统稳定性具有重要意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 数据搜集

本研究基于中国知网(CNKI)和“Web of science”数据库,以“放牧强度、轻度放牧、中度放牧、重度放牧”和“土壤微生物多样性、真菌多样性、细菌多样性”和“生态系统功能、生态系统多功能性”及“内蒙古草原”为关键词对2022年3月以前发表的文章进行检索。按照以下准则进行文章筛选:(1)所有的数据结果都来自于有对照(无放牧处理)的田间实验,且生境条件、植被和土壤类型与放牧地相似;(2)文章能明确描述放牧特征(放牧强度);(3)选择0~30 cm土层范围的数据;(4)如果研究中监测了季节动态,我们只选

择8月份的数据,即植被生长高峰期。对于每篇选定的文章,我们通过Getdata Graph Digitizer 2.2软件从表和图中提取数据的平均值,标准差和重复数。

Meta分析研究中,笔者共搜集29篇文章并建立数据库:土壤微生物多样性包括土壤真菌香依指数(Shannon-fungi)和土壤细菌香依指数(Shannon-Wiener index of fungi)和土壤细菌香依指数(Shannon-Wiener index of bacteria)。表征生态系统功能主要是植物生产力和养分循环两部分,其中植物生产力包括地上生物量(aboveground biomass, AGB)和地下生物量(belowground biomass, BGB),土壤养分循环包括有机碳(soil organic carbon, SOC)、铵态氮(ammonium nitrogen,  $\text{NH}_4^+$ )、硝态氮(nitrate nitrogen,  $\text{NO}_3^-$ )、有效氮(soil available nitrogen, AvN)、土壤全氮(soil total nitrogen, STN)、有效磷(soil available phosphorus, AvP)和土壤全磷(soil total phosphorus, STP),以上指标能有效表征生态系统的生产与生态功能<sup>[32]</sup>。此外,土壤水分(SM)和pH代表环境因素。我们还提取研究区的经度(longitude)、纬度(latitude)、海拔(altitude)、年均温(MAT)和年降雨(MAP)等指标。放牧强度根据原文描述被分为轻度放牧(LG)、中度放牧(MG)和重度放牧(HG)<sup>[23]</sup>。

### 1.2 数据分析

利用响应比(LnRR)表示相关指标对放牧的响应<sup>[14]</sup>:

$$\text{Ln}(\text{RR}) = \text{Ln} \left( \frac{X_{\text{grazing}}}{X_{\text{control}}} \right) = \text{Ln} X_{\text{grazing}} - \text{Ln} X_{\text{control}}$$

式中, $X_{\text{grazing}}$ 和 $X_{\text{control}}$ 分别表示放牧和对照组数据平均值。

利用文章提供的样本量对每个数据结果进行加权<sup>[23]</sup>:

$$\text{Weighting} = N_{\text{grazing}} \times N_{\text{control}} / (N_{\text{grazing}} + N_{\text{control}})$$

式中: $N_{\text{grazing}}$ 和 $N_{\text{control}}$ 分别指放牧和不放牧时的响应变量的数量。

相关指标对放牧的响应变化通过以下公式计算<sup>[33]</sup>:

$$\text{Percentage}(\%) = [\text{EXP}(\text{Ln}(\text{RR})) - 1] \times 100\%$$

首先,我们利用Origin 2021进行数据正态检验分析<sup>[34]</sup>,确定本研究选择的数据均符合正态分布。其

次,利用MetaWin 2.1软件中随机效应模型分析放牧强度对土壤微生物的Shannon—Wiener指数和单个生态系统功能指标的影响及其95%置信区间。然后,用表征生态系统功能的9个指标通过平均值法计算EMF对放牧强度的响应<sup>[29]</sup>,并用SPSS 23.0软件进行差异显著性分析。由于每篇文章提供的功能指标的数量不同,根据每篇文章提供的指标数(n)与总体选择的指标数(n=9)进行赋权,通过加权平均的方法计算EMF<sup>[23]</sup>。最后,利用Origin 2021进行微生物多样性与EMF相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 放牧强度对土壤细菌和真菌多样性的影响

细菌多样性对放牧干扰的响应更敏感。具体而言,整体放牧活动显著降低土壤细菌Shannon指数(-1.37%)( $P<0.05$ )。土壤细菌多样性随放牧强度增加呈下降趋势,尤其重度放牧显著降低细菌Shannon指数(-3.86%)( $P<0.05$ )(图1-A,表1)。放牧活动对真菌Shannon指数无显著影响(图1-B)。此外,真菌和细菌多样性在放牧强度之间无显著差异(图2-A,2-B)。

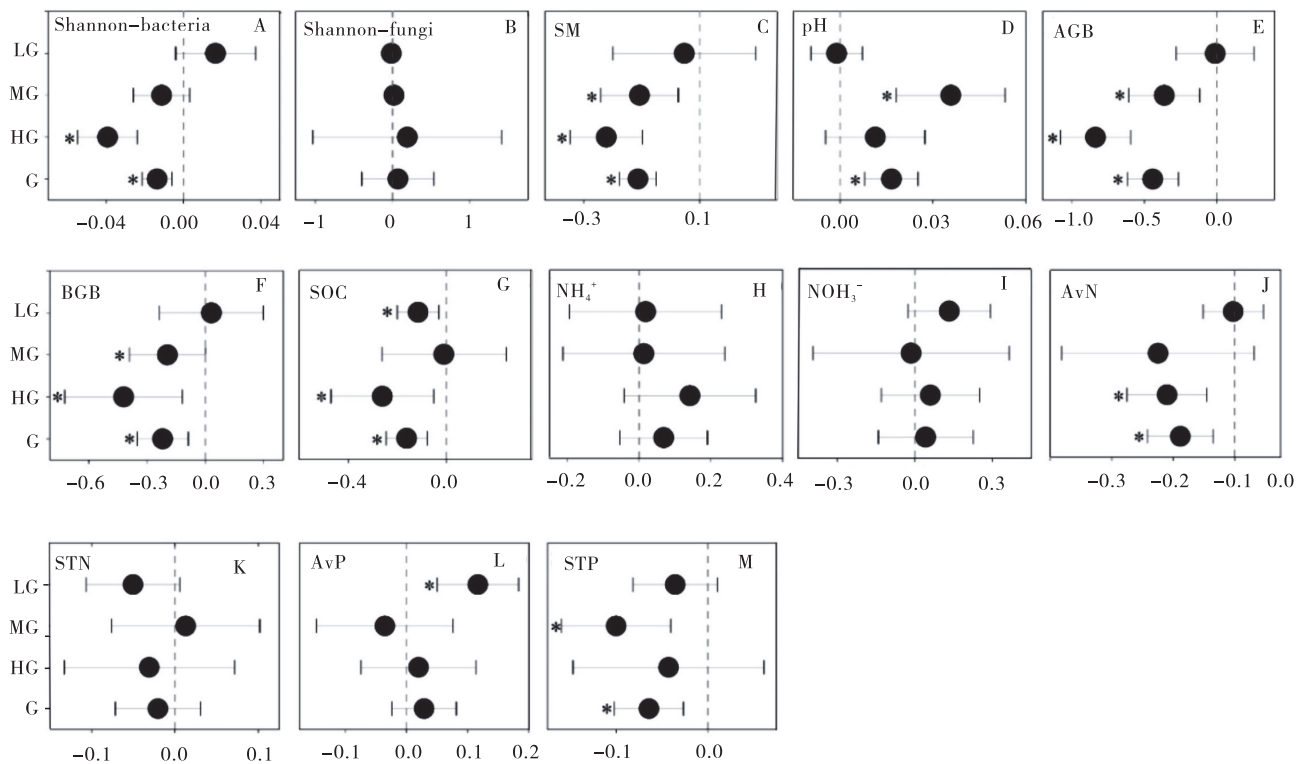


图1 放牧对土壤细菌和真菌多样性及个体生态系统功能指标的影响

Fig. 1 Effects of grazing on soil bacterial and fungi diversity as well as individual ecosystem function indicators

注:Shannon—bacteria:香依指数—细菌;Shannon—fungi:香依指数—真菌;SM:土壤水分;pH;AGB:地上生物量;BGB:地下生物量;SOC:有机碳; $\text{NH}_4^+$ :铵态氮; $\text{NO}_3^-$ :硝态氮;AvN:有效氮;STN:土壤全氮;AvP:有效磷;STP:土壤全磷;LG:轻度放牧;MG:中度放牧;HG:重度放牧;G:整体放牧效应。●表示效应值,误差棒表示95%置信区间,置信区间不与0重叠则表示具有显著影响。\*表示差异显著。

### 2.2 放牧强度对个体生态功能指标及EMF的影响

研究表明,放牧对植物生产力,部分与土壤养分循环相关的功能指标均产生负面影响并降低EMF。具体而言,整体放牧活动显著降低AGB、BGB、SOC、AvN和STP(-35.65%、-19.73%、-14.91%、-8.47%和-6.22%)( $P<0.05$ )(图1-E、F、G、J、M,表1)。AGB和BGB在MG和HG下均显

著降低(-30.37%、-17.75%;-56.66%、-34.33%)( $P<0.05$ )(图1-E、F,表1),且放牧干扰对地上生物量的影响大于地下生物量。此外,MG显著降低STP(-9.52%)(图1-M,表1),HG显著降低SOC和AvN(-22.93%、-10.43%)(图1-G、J),LG显著降低SOC(-10.86%)(图1-G,表1)但增加AvP(12.39%)( $P<0.05$ )(图1-I,表1)。放牧强度对 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和

STN 无显著影响(图 1-H-I,K)。与 LG 相比, MG 和 HG 显著降低 EMF(图 2-C)。此外, SM 随放牧强度增加而下降, SM 在 MG 和 HG 下显著降低 14.41% 和 21.45%(图 1-C,表 1), MG 显著增加 pH(3.64%)(图 1-D,表 1)。

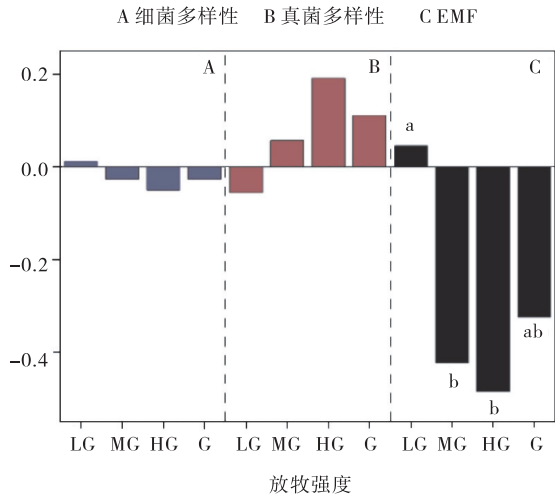


图 2 放牧强度对细菌多样性,真菌多样性和生态系统多功能性(EMF)的影响

Fig. 2 Effects of grazing on soil bacterial diversity, fungal diversity and ecosystem multifunctionality (EMF)

### 2.3 微生物多样性与 EMF 的关系对放牧强度的响应

细菌多样性与 EMF 关系斜率的绝对值随放牧强度增加而增加。细菌多样性与 EMF 在 MG 和 HG 下呈显著负相关( $P < 0.05$ )。真菌多样性与 EMF 在 HG

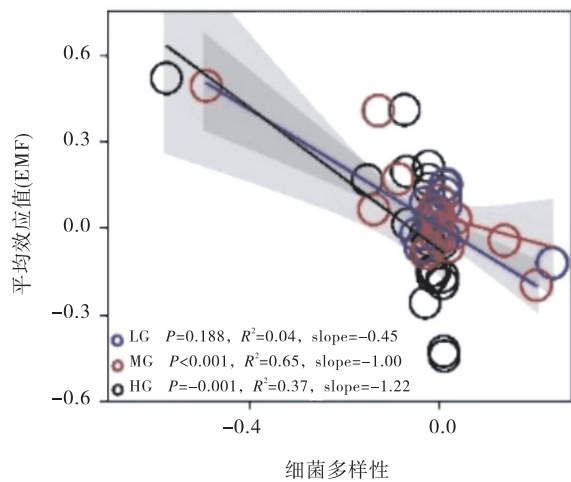


图 3 真菌多样性和细菌多样性与 EMF 的关系对放牧强度的响应

Fig. 3 The relationship of soil bacterial diversity and fungal diversity with ecosystem multifunctionality (EMF) response to grazing intensity

下呈正相关趋势(图 3)。

## 3 讨论

### 3.1 放牧干扰对细菌和真菌多样性的差异影响

土壤微生物能快速响应其周边微环境的变化,从而反映草地生态系统对环境变化的响应,是影响草地生态系统稳定性的重要因素<sup>[9]</sup>。本研究表明,细菌对放牧干扰的响应较真菌敏感,与贝加尔针茅草原重度放牧显著降低土壤细菌多样性<sup>[35]</sup>,荒漠草原重度放牧只显著降低细菌  $\alpha$  多样性但对真菌影响不显著相一致<sup>[36]</sup>。这一结果主要是因为地上植被、土壤理化性质随放牧强度的增加而发生显著改变,导致微生物生存环境改变,从而降低细菌多样性<sup>[37]</sup>。具体来说,土壤微生物多样性受多种环境因素制约,研究表明细菌群落更多地受到土壤特征的影响<sup>[38]</sup>,本研究重度放牧显著降低了土壤有机碳含量,可能是由于减少了地上和地下生物量从而降低了地下碳输入<sup>[39]</sup>,这与我国东北地区重度放牧通过调控土壤有机碳影响细菌多样性的过程相一致<sup>[40]</sup>。此外,土壤水分是细菌群落对放牧强度响应的指示指标,土壤水分的减少会降低细菌多样性<sup>[41]</sup>。内蒙古地区处于我国北方干旱及半干旱区,受水分限制严重。放牧通过减少地上生物量和践踏等方式导致土壤水分渗透性降低和蒸发量增加,表现为水分含量显著降低,从而减少细菌多样性。重要的是,土壤真菌菌丝网络广泛,具有更好的耐旱性<sup>[42]</sup>,在

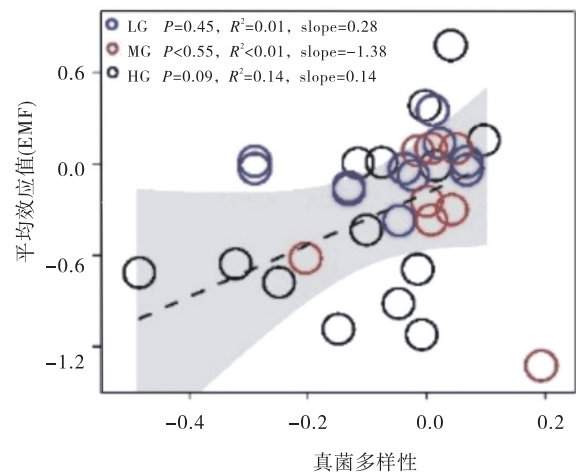


表1 土壤微生物多样性和生态系统功能指标对放牧的响应变化

Table 1 Response changes of grazing on soil microbial diversity and ecosystem function indicators

指标	处理	响应变化比/%	指标	处理	响应变化比/%
Shannon -bacteria	G	-1.37	Shannon-fungi	G	7.19
	HG	-3.86		HG	20.99
	MG	-1.13		MG	1.89
	LG	1.65		LG	-1.44
pH	G	1.67	SM	G	-14.76
	HG	1.15		HG	-21.45
	MG	3.64		MG	-14.41
	LG	-0.11		LG	-3.89
STP	G	-6.22	AGB	G	-35.65
	HG	-4.19		HG	-56.66
	MG	-9.52		MG	-30.37
	LG	-3.50		LG	-1.06
BGB	G	-19.73	SOC	G	-14.91
	HG	-34.33		HG	-22.93
	MG	-17.75		MG	-0.97
	LG	3.17		LG	-10.86
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	G	7.09	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	G	4.25
	HG	15.23		HG	6.18
	MG	1.30		MG	-1.44
	LG	1.83		LG	14.19
AvN	G	-8.47	STN	G	-2.03
	HG	-10.43		HG	-3.05
	MG	-11.72		MG	1.29
	LG	-0.24		LG	-4.92
AvP	G	2.92			
	HG	2.00			
	MG	-3.48			
	LG	12.39			

我国北方干旱水平大于0.8阈值条件下,真菌能够积极调控土壤多功能性<sup>[43]</sup>。因此,相对稳定的土壤真菌多样性可能是对环境压力的一种积极响应。

### 3.2 放牧强度增加导致生态系统多功能性降低

生态系统多功能性被用作指示放牧对生态系统功能过程影响的重要指标<sup>[24,28-29]</sup>,本研究表明中度和重度放牧对内蒙古地区生态系统多功能性的维持具有消极影响(图2),与在内蒙古四子王旗开展的放牧对多功能性研究的结果相一致<sup>[28]</sup>。从生产力和土壤养分两方面进行评估并发现,随着放牧强度增加,植物生物量逐渐降低,并且地上生物量比地下生物量下降程度更高。家畜通过直接采食和践踏等行为,一方面会伤害植物组织并抑制其生长,另一方面牲畜选择性采食会改变植物群落结构,使得优良牧草迅速减少,体现在生物量显著降低<sup>[44]</sup>。在内蒙古克氏针茅草

原进行的研究表明过度放牧会显著减少地上生物量,使得牧草的生长无法补偿牧草的消耗,最终导致草原退化<sup>[45]</sup>。此外,家畜践踏导致的厌氧环境会限制植物生产,特别是根系的生长<sup>[46]</sup>,从而导致地下生物量的减少。放牧强度增加,也会导致土壤养分含量降低<sup>[7]</sup>,本研究表明随放牧强度增加,与碳氮磷循环相关的指标逐渐降低。Meta研究表明放牧显著增加了土壤C和N的损失<sup>[17]</sup>。土壤有机碳主要来源于植物凋落物分解及根系分泌物,过度放牧会导致品质优良且凋落物质量高的物种减少,促进受化学保护的凋落物质量低的植物生长,从而导致地下养分的输入减少并减缓养分循环速度<sup>[47]</sup>。

### 3.3 真菌多样性介导EMF对放牧的响应

通过分析放牧强度对微生物多样性与EMF关系的影响发现,细菌多样性与EMF显著负相关程度随

着放牧强度增加而增加,这可能是因为高强度的放牧导致资源水分和养分等资源更稀缺,重度放牧显著降低细菌多样性将会导致生态系统功能的进一步下降,形成负反馈,进而加剧多样性与生态功能之间的负相关。此外,真菌多样性与EMF在重度放牧条件下正相关,可能是因为在养分贫瘠和干旱条件下,初级生产力的很大一部分作为顽固的凋落物返回到土壤中,而真菌中的腐生真菌作为促进分解和矿化以及获取土壤养分等过程中的主要分解者,能有效提高有机物由复杂和顽固的聚合物分解为简单物质的速率<sup>[48]</sup>,这一过程有助于土壤多功能性维持,并进一步表明真菌多样性在维持内蒙古草地生态系统多功能性中具有重要作用,需要更高的物种多样性维持生态系统多功能性<sup>[26-27]</sup>。

#### 4 结论

细菌多样性对放牧干扰的响应更敏感,重度放牧显著降低细菌多样性。中度和重度放牧通过对个体功能指标的消极影响从而显著降低内蒙古地区草地生态系统多功能性。真菌多样性与生态系统多功能性在重度放牧下的正相关关系表明需要更高水平的多样性维持生态系统多功能性。因此,合理的利用方式是草地健康可持续发展的关键,建议在内蒙古草原进行轻度放牧。

#### 参考文献:

- [1] 王中华. 不同放牧强度对典型草原土壤多功能性的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2022.
- [2] Wall D H, Nielsen U N, Six J. Soil biodiversity and human health[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 69-76.
- [3] Manning P, van der Plas F, Soliveres S, *et al.* Redefining ecosystem multifunctionality[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(3): 427-436.
- [4] 曲同宝, 张建峰, 杜玮超, 等. 放牧对草地土壤微生物多样性影响研究进展[J]. *当代生态农业*, 2012(Z2): 14-20.
- [5] Zhao Y, Liu Z, Wu J. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions [J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(4): 793-814.
- [6] Charles G K, Porensky L M, Riginos C, *et al.* Herbivore effect on productivity vary by guild: cattle increase mean productivity while wildlifereduce variability [J]. *Ecological Applications*, 2017, 27(1): 143-155.
- [7] Zhan T, Zhang Z, Sun J, *et al.* Meta-analysis demonstrating that moderate grazing can improve the soil quality across China's grassland ecosystems [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 147: 103438.
- [8] 魏巍, 周娟娟, 刘云飞, 等. 草地利用方式对藏嵩草沼泽化高寒草甸植被和土壤特征的影响 [J]. *草原与草坪*, 2022, 42(4): 55-61.
- [9] 李宏. 放牧对天山北坡山地草甸植物和土壤微生物群落特征的影响 [D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2022.
- [10] Liu Y, Gong Y, Wang X, *et al.* Volume fractal dimension of soil particles and relationships with soil physical-chemical properties and plant species diversity in an alpine grassland under different disturbance degrees [J]. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(4): 480-487.
- [11] Houlbrooke D J, Littlejohn R P, Morton J D, *et al.* Effect of irrigation and grazing animals on soil quality measurements in the North Otago Rolling Downlands of New Zealand [J]. *Soil Use and Management*, 2008, 24(4): 416-423.
- [12] Zeng C, Wu J, Zhang X. Effects of Grazing on Above-vs. Below-Ground Biomass Allocation of Alpine Grasslands on the Northern Tibetan Plateau [J]. *Plos One*, 2015, 10(8): e135173.
- [13] Zuo X, Zhang J, Lv P, *et al.* Effects of plant functional diversity induced by grazing and soil properties on above-and belowground biomass in a semiarid grassland [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 555-561.
- [14] 詹天宇, 孙建, 张振超, 等. 基于meta分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影响 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(12): 1847-1858.
- [15] 贾丽欣, 张峰, 乔芙蓉, 等. 放牧强度对荒漠草原无芒隐子草斑块碳氮化学计量特征的影响 [J]. *中国草地学报*, 2019, 41(1): 9-16.
- [16] 王明君, 赵萌莉, 崔国文, 等. 放牧对草甸草原植被和土壤的影响 [J]. *草地学报*, 2010, 18(6): 758-762.
- [17] Zhou G, Zhou X, He Y, *et al.* Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(3): 1167-1179.
- [18] 赵宁, 张洪轩, 王若梦, 等. 放牧对若尔盖高寒草甸土壤氮矿化及其温度敏感性的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4234-4241.
- [19] 邬嘉华, 王立新, 张景慧, 等. 温带典型草原土壤理化性

- 质及微生物量对放牧强度的响应[J]. 草地学报, 2018, 26(4):832—840.
- [20] 李文, 李小龙, 刘玉祯, 等. 不同强度放牧对东祁连山高寒灌丛土壤理化特征的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(4):8—15.
- [21] Delgado—Baquerizo M, Eldridge D J, Ochoa V, *et al.* Soil microbial communities drive the resistance of ecosystem multifunctionality to global change in drylands across the globe. [J]. Ecology letters, 2017, 20(10).
- [22] Van Syoc E, Albeke S E, Scasta J D, *et al.* Quantifying the immediate response of the soil microbial community to different grazing intensities on irrigated pastures [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 326: 107805.
- [23] Zhang R, Tian D, Chen H Y H, *et al.* Biodiversity alleviates the decrease of grassland multifunctionality under grazing disturbance: A global meta-analysis [J]. Global Ecology and Biogeography, 2022, 31(1):155—167.
- [24] Wang L, Delgado—Baquerizo M, Wang D, *et al.* Diversifying livestock promotes multidiversity and multifunctionality in managed grasslands [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(13):6187—6192.
- [25] 王凯, 王聪, 冯晓明, 等. 生物多样性与生态系统多功能性的关系研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(1):11—23.
- [26] Delgado—Baquerizo M, Reich P B, Trivedi C, *et al.* Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes [J]. Nature Ecology & Evolution, 2020, 4(2):210—220.
- [27] Wagg C, Schlaeppi K, Banerjee S, *et al.* Fungal—bacterial diversity and microbiome complexity predict ecosystem functioning [J]. Nature Communications, 2019, 10(1).
- [28] Zhang R, Wang Z, Niu S, *et al.* Diversity of plant and soil microbes mediates the response of ecosystem multifunctionality to grazing disturbance [J]. Science of The Total Environment, 2021, 776:145730.
- [29] Wang X, Li F Y, Wang Y, *et al.* High ecosystem multifunctionality under moderate grazing is associated with high plant but low bacterial diversity in a semi—arid steppe grassland [J]. Plant and Soil, 2020, 448(1—2): 265—276.
- [30] Ren H, Eviner V T, Gui W, *et al.* Livestock grazing regulates ecosystem multifunctionality in semi-arid grassland [J]. Functional Ecology, 2018, 32(12):2790—2800.
- [31] 闫宝龙, 吕世杰, 赵萌莉, 等. 草原生态安全评价方法研究进展[J]. 中国草地学报, 2019, 41(5):164—171.
- [32] Garland G, Banerjee S, Edlinger A, *et al.* A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality: A review [J]. Journal of Ecology, 2021, 109(2):600—613.
- [33] Zhao F, Ren C, Shelton S, *et al.* Grazing intensity influence soil microbial communities and their implications for soil respiration [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 249:50—56.
- [34] Shi L, Lin Z, Tang S, *et al.* Interactive effects of warming and managements on carbon fluxes in grasslands: A global meta—analysis [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 340:108178.
- [35] 张永生, 赖欣, 张静妮, 等. 放牧对贝加尔针茅草原土壤细菌群落结构的影响 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2457—2463.
- [36] 杨阳, 贾丽欣, 乔莽璐, 等. 重度放牧对荒漠草原土壤养分及微生物多样性的影响 [J]. 中国草地学报, 2019, 41(4):72—79.
- [37] 张永生. 放牧对贝加尔针茅草原土壤理化性状及细菌多样性的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [38] Millard P, Singh B K. Does grassland vegetation drive soil microbial diversity? [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88(2):147—158.
- [39] Aldezabal A, Moragues L, Odriozola I, *et al.* Impact of grazing abandonment on plant and soil microbial communities in an Atlantic mountain grassland [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96:251—260.
- [40] Qu T B, Du W C, Yuan X, *et al.* Impacts of Grazing Intensity and Plant Community Composition on Soil Bacterial Community Diversity in a Steppe Grassland [J]. Plos One, 2016, 11(7).
- [41] Xu Y, Li L, Wang Q, *et al.* The pattern between nitrogen mineralization and grazing intensities in an Inner Mongolian typical steppe [J]. Plant and Soil, 2007, 300(1—2): 289—300.
- [42] Fry E L, Savage J, Hall A L, *et al.* Soil multifunctionality and drought resistance are determined by plant structural traits in restoring grassland [J]. Ecology, 2018, 99(10): 2260—2271.
- [43] Hu W, Ran J, Dong L, *et al.* Aridity—driven shift in biodiversity—soil multifunctionality relationships [J]. Nature

- Communications, 2021, 12(1).
- [44] 许婷婷,董智,郭建英,等. 放牧对内蒙古典型草原植物群落特征与土壤有机碳的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2273—2279.
- [45] 候伟峰,乌恩,敖特根,等. 放牧强度对克氏针茅典型草原地上生物量的影响[J]. 中国草地学报, 2016, 38(6): 71—77.
- [46] Bejarano M D, Villar R, Murillo A M, *et al.* Effects of soil compaction and light on growth of *Quercus pyrenaica* Willd. (Fagaceae) seedlings [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(1): 108—114.
- [47] Wang Z, Ding Y, Jin K, *et al.* Soil bacterial and fungal communities are linked with plant functional types and soil properties under different grazing intensities[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1).
- [48] Bastida F, Torres I F, Moreno J L, *et al.* The active microbial diversity drives ecosystem multifunctionality and is physiologically related to carbon availability in Mediterranean semi-arid soils[J]. *Molecular Ecology*, 2016, 25(18): 4660—4673.

## Meta-analysis of effect of grazing intensity on soil microbial diversity and ecosystem multifunctionality of grassland ecosystems in Inner Mongolia

YAO Ze-ying<sup>1</sup>, ZHANG De-gang<sup>1\*</sup>, SHAO Xin-qing<sup>2\*\*</sup>, YE Wen-ge<sup>3</sup>,  
JIACAI Rang-dongzhu<sup>3</sup>

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 2. Collage of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Bianma Management Station of Yeniugou Forest Farm, Qilian Country, Haibei Province 810499, China)

**Abstract:** 【Objective】 To investigate the effects of grazing intensity on soil microbial diversity and individual ecosystem function indicators in Inner Mongolia grasslands, and to comprehensively assess the response of ecosystem multifunctionality (EMF) to grazing intensity. 【Method】 This study employed a Meta-analysis approach, integrating data from 29 articles that examined the effects of grazing intensity on ecosystem multifunctionality in Inner Mongolia. 【Result】 The findings indicate that bacterial diversity is more sensitive to grazing intensity compared to fungal diversity, with severe grazing significantly reducing the Shannon—Wiener index of bacteria. Moderate and heavy grazing significantly decrease the multifunctionality of grassland ecosystems in the Inner Mongolia region. Fungal diversity plays a crucial role in regulating the multifunctionality of grassland ecosystems in Inner Mongolia. 【Conclusion】 It is recommended to implement light grazing in Inner Mongolia grasslands to promote the healthy and sustainable development of grassland ecosystems.

**Key words:** grazing intensity; soil bacterial diversity; soil fungi diversity; ecosystem multifunctionality; Inner Mongolia grassland

(责任编辑:康宇坤)