

# Meta 分析中国不同类型草地放牧强度对土壤氮素矿化作用的影响

朱辉<sup>1</sup>,王燕<sup>2</sup>,王云英<sup>3</sup>,许庆民<sup>1</sup>,杜岩功<sup>3</sup>

(1. 青海省生态环境监测中心,青海 西宁 810001;2. 济宁市嘉祥县自然资源和规划局,山东 济宁 272000;  
3. 中国科学院西北高原生物研究所,青海 西宁 810001)

**摘要:**氮是草地生产功能的重要限制因素,氮素矿化作用为草地肥力的重要指标。草地生态系统净氮矿化速率对放牧干扰存在不同的响应特征,本研究采用 Meta 分析方法,通过对中国草地已开展的 32 个有关放牧对草地矿化作用影响的试验结果进行整合分析。结果表明:放牧轻微增加我国草地土壤净氮矿化速率,增幅约 0.68%,平均效应值为  $0.01 \pm 0.13$  (置信区间为  $-0.24 \sim 0.25$ )。放牧极显著增加了高寒草甸矿化作用 ( $P < 0.05$ ),平均效应值约为  $0.38 \pm 0.10$ 。放牧降低了温性草原、温性荒漠和沼泽湿地 ( $P > 0.05$ ) 土壤净氮矿化速率。放牧强度对平均效应值具有极显著影响 ( $P < 0.0001$ ),轻度和中度放牧提高氮素矿化速率分别为 13.88% 和 5.12%,而重度放牧降低草地氮素矿化速率约 9.42%。土壤湿度和海拔对平均效应值具有显著正效应影响 ( $P > 0.05$ ),分别可以解释 14.30% 和 13.61% 的效应值变异。轻度和中度放牧有利于提高我国草地生态系统氮素矿化作用和供给能力,可以作为草地生产管理的重要利用方式。暖湿化气候情景有助于提升草地生态系统氮素矿化作用和供给能力。

**关键词:**矿化作用;平均效应值;放牧强度;效应值变异

**中图分类号:**S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)05-0080-07

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyyep.2021.05.011

氮素被认为是限制草地生态系统初级生产力的关键元素<sup>[1]</sup>。氮矿化作用指土壤中有有机态氮在微生物的作用下转化为无机氮的过程,是氮素供给能力的重要指标<sup>[2-3]</sup>。土壤氮素大部分以有机氮形式存在,无机氮仅占土壤全氮的 1%~5% 左右<sup>[4-5]</sup>,速效氮含量高主要依赖于土壤氮矿化作用<sup>[6-7]</sup>。

我国是草地资源大国,草地面积约占国土总面积的 41.7%,根据中国草地分类系统,天然草地划分为

18 大类,目前 90% 天然草地处于不同程度退化状态<sup>[8-9]</sup>。放牧是草地的重要利用方式,家畜排泄物和采食行为直接影响土壤微生物分解过程和氮矿化速率,间接调节氮循环过程<sup>[10]</sup>。轻度放牧利用的高寒草甸具有最高的氮矿化速率 ( $0.34 \text{ mg/kg}$ ),轻度、中度和重度放牧草地氮素矿化速率分别比对照增加 46.5%、35.2% 和 3.5%<sup>[11]</sup>。适度放牧显著提升高寒草原、典型草原、沼泽湿地及荒漠草原土壤矿化速率<sup>[4,10,12]</sup>。中度放牧短花针茅荒漠草原土壤矿化速率最高,明显高于轻度 and 重度放牧处理<sup>[13]</sup>。重度放牧赖草草地净氮矿化速率最高,为  $1.58 \text{ mg/kg}$ ,显著高于轻度放牧样地 ( $1.15 \text{ mg/kg}$ )<sup>[2]</sup>。重度放牧草地土壤氮素周转加快<sup>[14]</sup>。但也有研究发现,内蒙古围封羊草草地矿化速率明显高于自由放牧样地<sup>[15]</sup>,重度放牧显著降低了欧亚温带草原<sup>[6]</sup> 和高寒草甸<sup>[16]</sup> 土壤净氮矿化速率,过度放牧草地矿化后养分很容易淋溶损失<sup>[16]</sup>。此外,放牧干扰下沼泽草甸氮矿化量为负值,

收稿日期:2020-11-30;修回日期:2021-03-24

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31770532);青海省自然科学基金(2018-ZJ-914)

作者简介:朱辉(1968-),男,河北灵寿县人,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:2968211257@qq.com

杜岩功为通讯作者。

E-mail:ygdu@nwipb.cas.cn

表明植物生长盛期植物大量吸收无机氮,土壤变为氮固持状态<sup>[4]</sup>。造成以上差异的原因可能是草地生态系统空间的异质性。土壤温度和含水量是影响高寒草甸和荒漠草原土壤净氮矿化作用季节动态模式的主要环境因素<sup>[10,13]</sup>。重度放牧对欧亚温带典型草原土壤氮矿化的影响受气候条件(温度和降水)的调控<sup>[6]</sup>。温度对高寒草甸净氮矿化速率具有显著影响<sup>[11,17]</sup>。土壤氮矿化作用随温度升高而逐渐增强<sup>[18]</sup>。重度放牧土壤湿度比轻度放牧草地降低 41.35%<sup>[19]</sup>。适宜温度和湿度(22℃和 40~60%的田间持水量)条件,高寒草甸土壤氮矿化速率较高<sup>[14]</sup>。高寒草甸氮矿化率与海拔梯度呈显著负相关关系<sup>[14]</sup>。放牧改变草地土壤通透性,有利于土壤氮素矿化作用<sup>[4]</sup>。粪便等排泄物的营养归还还是放牧提高土壤氮循环速率的主要原因<sup>[12]</sup>。

单个控制试验对于理解具体生态系统的响应非常关键,但陆地生态系统响应特征的普遍规律需要使用整合研究的手段,可以直接为陆面模型提供参数和理论依据<sup>[20]</sup>。Meta 分析揭示施氮显著提高了陆地生态系统土壤铵态氮浓度(47%)和凋落物量(24%),降低微生物量 5.8%<sup>[3]</sup>。本研究通过对中国草地已开展的 32 个有关放牧对草地矿化作用影响的试验结果进行整合分析,揭示我国草地生态系统氮矿化速率对放牧强度的响应特征及主要调控因素,预测气候变化对土壤氮矿化的影响,可为放牧草地生态系统适应性管理提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 数据收集

基于中国知网(CNKI)数据库,检索关键词“放牧”且“矿化”,中英文论文共搜索到 29 篇并下载全文。按照如下准则进行文章筛选:研究对象为中国草地生态系统,土壤净氮矿化速率采用原位培养法,均在生长季开展相关研究工作。最终 14 篇论文、包含 32 组研究数据被采用,进行数据整合分析。调查样点主要分布于内蒙古自治区、青海省、西藏自治区和甘肃省等。对于原文以图片发表的数据,采用 WebPlotDigitizer (Version 4.3) 软件进行数据提取。本研究放牧强度的划分,均采用原文分类方法,草地类型根据中国草地分类系统划分,包括高寒草甸、温性草原、温性荒漠和

沼泽湿地。本研究引入了分类变量即不同放牧强度作为解释变量,探讨不同放牧强度对平均效应值的影响(轻度、中度和重度放牧按照原文设置梯度,以围封作为对照)。同时提取年均温、降水量、海拔、地上生物量、土壤湿度、有机质、全氮、容重和 pH 等数据作为连续变量,揭示放牧草地氮素矿化作用平均效应值的影响因素。

### 1.2 基于均值的效应值(响应比)

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

式中: $x_e$ 为放牧草地净氮矿化速率均值, $x_c$ 为对照的均值, $\ln R$ 为处理响应比。

与效应值相对应的研究内方差:

$$V_{\ln R} = \frac{S_e^2}{N_e x_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c X_c^2}$$

式中: $V_{\ln R}$ 为研究内方差, $S_e$ 为处理的标准差, $S_c$ 为对照的标准差, $N_e$ 和 $N_c$ 分别为处理和对照样本量。

基于随机效应模型的平均效应值及置信区间的计算:

$$\text{单个研究结论的权重: } w_i^* = 1/(v_i + \tau^2)$$

$$\text{平均效应值: } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i^* y_i}{\sum_{i=1}^k w_i^*}$$

$$\text{总体标准误差: } SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i^*}}$$

$$\text{平均效应值的 95\% 置信区间: } CI = \bar{y} \pm 1.96 SE$$

式中: $v_i$ 表示研究内方差, $\tau^2$ 表示研究间方差, $y_i$ 为单个研究效应值。

效应值异质性检验( $Q_i$ ):

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

解释变量对效应值影响程度检验( $Q_m$ ):

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

### 1.3 数据统计分析方法

数据通过 R 语言(3.6.1 版本)程序 metafor1.9-8 软件包分析。效应值和平均效应值的计算采用随机效应模型。当效应值整体异质性较强( $Q_i$ 值较高,且 $P < 0.05$ ),表明放牧处理的效应值存在较大差异。基于混合效应模型,引入解释变量(包括分类变量和连续变

量)对这种差异进行分析。发表偏差通过漏斗图对称性检验完成,当  $P$  值远大于 0.05,说明本研究所采用数据检验结果基本对称,无发表偏差。

## 2 结果与分析

### 2.1 放牧对中国草地生态系统氮素矿化作用影响的平均效应值

平均效应值表示放牧处理与对照组的差异程度,是表明放牧对草地生态系统氮素矿化速率影响的指标,效应值越大则放牧作用效应越强。放牧略增加我国草地土壤净氮矿化速率,平均效应值为  $0.01 \pm 0.13$  (95%置信区间为  $-0.24 \sim 0.25$ ) (图 1),增加幅度为

0.68%。

放牧对草地矿化作用影响的顺序为:高寒草甸 > 温性草原 > 温性荒漠 > 沼泽湿地(图 2)。放牧活动极显著增加了高寒草甸矿化作用,平均效应值约为  $0.38 \pm 0.10$  ( $P < 0.05$ )。放牧降低温性草原( $-0.18 \pm 0.25$ )和温性荒漠( $-0.38 \pm 0.29$ )土壤矿化作用,显著降低了沼泽湿地净氮矿化速率( $-1.36 \pm 0.76$ ,  $P > 0.05$ ),即放牧沼泽湿地矿化速率是对照的 3.89 倍。不同放牧强度对矿化速率影响的效应值异质性(Qe)检验表明,放牧强度对草地矿化作用影响的异质性很强( $P < 0.0001$ ,表 2),需要引入解释变量(分类变量和连续变量)对异质性的来源进行进一步探讨。

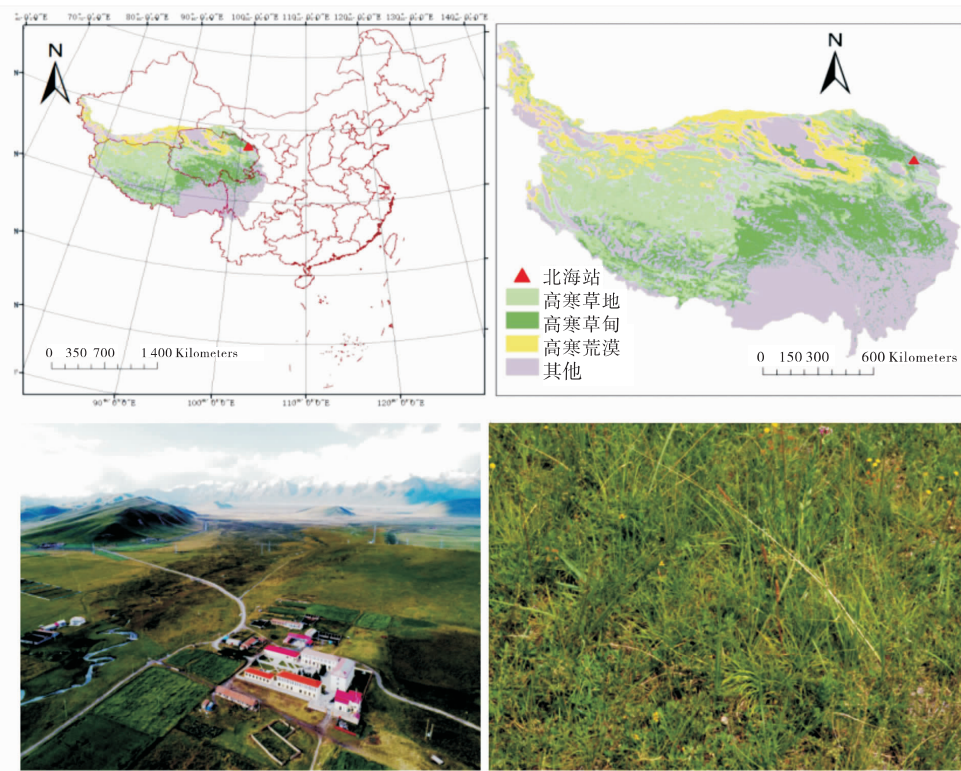


图 1 放牧对中国草地土壤净氮矿化速率影响的效应值森林图

Fig. 1 Forest plots of effect size of grazing on grassland nitrogen mineralization

表 1 放牧及不同放牧强度对平均效应值的影响及 95%置信区间

Table 1 Effects of grazing and grazing intensification on effect size and confidence interval

因素	平均效应值	95%置信区间
放牧干扰	$0.01 \pm 0.13$	$-0.24 \sim 0.25$
轻度放牧	$0.13 \pm 0.26^a$	$-0.38 \sim 0.63$
中度放牧	$0.05 \pm 0.22^b$	$-0.39 \sim 0.49$
重度放牧	$-0.09 \pm 0.19^c$	$-0.48 \sim 0.29$

注:同列不同小字母表示差异显著( $P > 0.05$ )

表 2 放牧对矿化速率影响的效应值异质性检验

Table 2 Effects of grazing on residual heterogeneity (Qe)

因素	异质性检验	$P$ 值
放牧	2 665.23	$P < 0.0001$

### 2.2 放牧强度对中国草地生态系统矿化作用影响的平均效应值及异质性检验

不同放牧强度对平均效应值具有极显著影响( $P < 0.0001$ )。平均效应值从高到低顺序,依次为轻

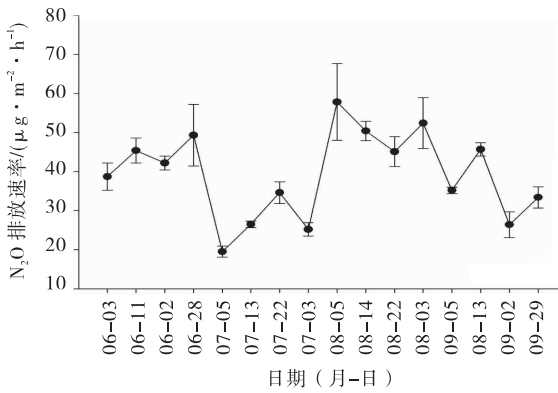


图 2 放牧下不同类型草地平均效应值的影响

Fig. 2 Average effect value of mineralization for different types of grassland under grazing

注: \*\* 表示  $P < 0.05$ , \* 表示  $P > 0.05$

度放牧 > 中度放牧 > 重度放牧, 三者之间存在显著差异 ( $P > 0.05$ )。轻度和中度放牧提高氮素矿化速率,

增幅分别为 13.88% 和 5.12%, 重度放牧降低草地矿化作用, 降幅约 9.42% (表 1)。异质性检验结果表明, 平均效应值残差仍具有异质性, 需要引入其他解释变量 ( $P < 0.0001$ ) (表 2)。

### 2.3 平均效应值对气候因子及土壤理化性质等变量的响应特征

本研究引入了解释变量, 包括样地海拔、年均温、降水量、地上生物量、土壤有机质、全氮、容重、pH 等因素。土壤湿度和海拔对平均效应值具有显著影响 ( $P > 0.05$ ) (表 3), 分别可以解释 14.30% 和 13.61% 的效应值变异。基于拟合方程结果, 可以发现平均效应值与土壤湿度、海拔、降水量、年均气温间之间存在正相关关系, 而与全磷、有机质、地上生物量、pH 和全氮均存在负相关关系。

表 3 放牧平均效应值对气象因子和土壤理化性质的响应

Table 3 Response of cumulative effect sizes on soil physical and climate factors

解释变量(x)	异质性检验	P	拟合方程	效应值变异 R <sup>2</sup>
土壤湿度	3.06	<0.05	$Y = 0.43 + 0.0089x$	14.30
海拔	3.91	<0.05	$Y = -0.47 + 0.0002x$	13.61
降水量	1.81	0.18	$Y = -0.39 + 0.001x$	5.91
全磷	1.57	0.21	$Y = 0.87 - 1.74x$	4.56
容重	0.47	0.49	$Y = 1.12 - 1.04x$	2.84
有机质	0.48	0.49	$Y = 0.15 - 0.03x$	0.00
地上生物量	0.48	0.49	$Y = -0.22 - 0.002x$	0.00
年均气温	0.35	0.56	$Y = 0.04 + 0.036x$	0.00
pH	0.17	0.68	$Y = 0.88 - 0.084x$	0.00
全氮	0.03	0.86	$Y = 0.35 - 0.009x$	0.00

注: 表中 Y 是平均效应值

### 2.4 放牧对我国草地生态系统氮素矿化速率影响效应值漏斗图的对称性检验

Meta 分析是对效应值和平均效应值的定量化评价, 数据来源于已经公开发表的研究论文, 可能会受选择性偏倚的影响。通过对漏斗图的对称性进行检验分析 ( $z = -1.18, P = 0.24$ ), 发现 P 值远大于 0.05, 说明研究所采用数据检验结果基本对称 (图 3)。本研究并无研究论文发表偏爱性, 研究结果具有充分可信度。

## 3 讨论

### 3.1 草地生态系统氮素矿化速率对不同放牧强度的响应特征

土壤氮矿化作用作为氮素内循环的关键转换环节, 决定了氮素的可利用强度<sup>[13]</sup>。放牧家畜主要通过

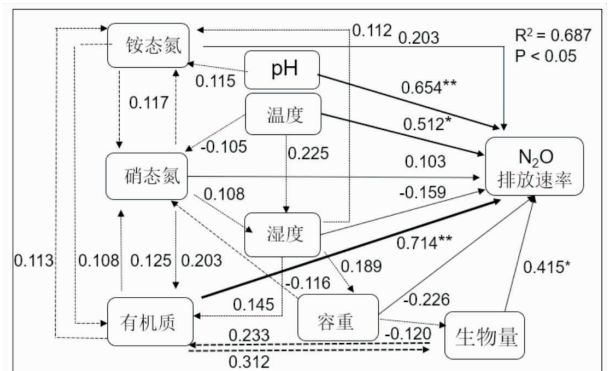


图 3 放牧对我国草地生态系统氮素矿化速率影响的发表偏爱性检验

Fig. 3 Egger's regression test for funnel plot asymmetry on effects size of grazing on the nitrogen mineralization rate of the grassland ecosystem

采食、践踏和排泄粪尿等形式影响草地碳氮营养物质循环,放牧对物质循环和能量流动具有重要的调控作用<sup>[2]</sup>。轻度和中度放牧适当增加草地物种丰富度、生物多样性、生产力及微生物丰度和多样性指数,但重度放牧显著降低草地生产功能、生物多样性、微生物群落特征<sup>[6-7]</sup>,适度放牧草地高质量的枯落物经过分解后进入到土壤有机质,为土壤微生物提供了氮源,促进了土壤微生物的活动,从而增加了土壤氮矿化速率,但是重度放牧优势种植物多为杂类草,其植物组织中氮含量较低,降低土壤矿化作用,进而延缓生态系统氮循环过程<sup>[13]</sup>。

适度放牧利用能够促进草地养分循环速率,进而提升草地生产性能<sup>[12]</sup>。本研究基于数据整合分析发现,轻度和中度放牧利用均可以有效提高草地生态系统氮素矿化速率,增幅分别为 13.88% 和 5.12%,重度放牧降低草地氮素矿化速率,降幅达到 9.42%。表明适度利用草地氮素供给能力高于围封和重度放牧样地,可以作为草地生产管理的重要方式。相似研究结果也揭示:随放牧强度增加,青藏高原高寒草甸土壤氮素矿化速率逐渐增强<sup>[14,21]</sup>。内蒙古轻度和中度放牧草甸草原净氮矿化速率比对照样地高 6%~15%,重度放牧进一步降低 108%<sup>[22]</sup>。这可能是因为草食动物可以改变土壤的紧实度和孔隙度,从而影响土壤氮矿化过程<sup>[12]</sup>。草食动物的取食改变草地生态系统群落组成,重度放牧植物生长严重受到氮素供给能力限制<sup>[12]</sup>。

### 3.2 环境因素对氮素矿化作用平均效应值的影响

放牧主要通过影响水分的变化和土壤温度进而影响土壤净氮矿化速率<sup>[2]</sup>。放牧降低高寒草地土壤湿度,改变干旱环境土壤微生物活性,影响土壤矿化作用<sup>[9]</sup>。西藏那曲地区围封和放牧高寒草甸土壤氮矿化量均与温度呈现显著正相关关系,放牧草地氮矿化量与土壤湿度呈现显著负相关关系<sup>[5]</sup>。内蒙古草甸草原净氮矿化速率主要受土壤湿度调控<sup>[23]</sup>。相对湿润的样点,温带草原土壤氮素矿化周转速率较快<sup>[6]</sup>。土壤湿度的增加可能导致青藏高原高寒草甸土壤无机氮的可利用性增加<sup>[24]</sup>。荒漠草原土壤净氮矿化速率与土壤温度和含水量均呈显著正相关关系<sup>[10]</sup>。受放牧干扰的沼泽化草甸土壤的矿化速率与土壤容重、pH 显

著正相关,而与土壤湿度显著负相关<sup>[4]</sup>。黄土高原草地净氮矿化速率与土壤有机碳含量之间呈现显著负相关关系<sup>[6]</sup>。

该研究发现土壤湿度和海拔对平均效应值具有显著正效应( $P>0.05$ )。草地主要分布在干旱和半干旱区,占干旱和半干旱区总面积 88%,养育了 25% 的世界人口<sup>[8]</sup>,北方草地也是我国重要的绿色生态屏障,对于提升生态系统服务和生态系统稳定性均具有重要作用。土壤湿度决定草地生态系统的水分供应状况、土壤通气性,直接影响土壤微生物活性和氮素矿化作用强度<sup>[24]</sup>。因此,在较大空间尺度上,以我国草地生态系统为研究对象,土壤湿度成为放牧草地生态系统氮素矿化速率的重要调控因素。海拔与气温和降水等气候因子紧密相关,高寒草甸生态系统海拔会明显高于温性草原、温性荒漠,具有相对较低的年均气温和较高的降水量,因此海拔因素同时体现了年均降水量、年均气温和土壤湿度的耦合作用。随海拔增加,青藏高原放牧高寒草地土壤氮素矿化速率明显降低<sup>[14]</sup>。

目前全球变暖趋势在持续,2019 年全球平均温度较工业化前水平高出 1.1℃,是有完整气象观测记录以来的第二暖年份<sup>[25]</sup>。2000 年以来,西北、东北和华北地区平均年降水量波动上升,东北和华东地区降水量年际波动幅度增大;2016 年以来,青藏地区降水量持续异常偏多<sup>[25]</sup>。暖湿化气候情景,将有助于提高我国草地生态系统氮素矿化速率和草地生产功能和绿色生态屏障功能。

## 4 结论

放牧轻微增加我国草地土壤净氮矿化速率。放牧对不同类型草地矿化作用影响的强度顺序为高寒草甸>温性草原>温性荒漠>沼泽湿地。放牧活动极显著增加了高寒草甸矿化作用,降低了温性草原和温性荒漠土壤矿化作用,显著降低了沼泽湿地净氮矿化速率。不同放牧强度对平均效应值具有极显著影响,平均效应值顺序依次为轻度放牧>中度放牧>重度放牧。土壤湿度和海拔对平均效应值具有显著正效应。轻度和中度放牧明显增加草地生态系统氮素矿化作用,可以作为草地生产管理的重要方式。

- 参考文献:
- [1] Tian H, Xu R, Canadell J G, *et al.* A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks[J]. *Nature*, 2020, 586: 248–256.
- [2] 任雨佳, 刘夏琳, 王惠玲, 等. 北方农牧交错带赖草草地土壤氮矿化对不同放牧强度的响应[J]. *草地学报*, 2020, 28(2): 328–337.
- [3] Lu M, Yang Y, Luo Y, *et al.* Responses of ecosystem nitrogen cycle to nitrogen addition: a meta-analysis[J]. *New Phytologist*, 2011, 189: 1840–1850.
- [4] 王雪, 郭雪莲, 郑荣波, 等. 放牧对滇西北高原纳帕海沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(7): 2308–2314.
- [5] 杜薇, 孙楠, 周古月, 等. 温湿度对不同管理方式高寒草甸土壤氮矿化的影响[J]. *草原与草坪*, 2018, 38(4): 1–11.
- [6] 高丽, 侯向阳, 王珍, 等. 重度放牧对欧亚温带草原东缘生态样带土壤氮矿化及其温度敏感性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5095–5105.
- [7] Chen D, Zhang S, Dong S, *et al.* Effect of land-use on soil nutrients and microbial biomass of an alpine region on the northeastern Tibetan plateau, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 21(5): 446–452.
- [8] 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.
- [9] 舒锴, 柯浔, 辛莹, 等. 青藏高原多稳态高寒草甸生态系统蒸散特征对比研究[J]. *草原与草坪*, 2019, 39(6): 83–88.
- [10] 单玉梅, 孙海莲, 陈海军, 等. 不同放牧强度下荒漠草原土壤氮矿化季节性动态研究[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(4): 723–731.
- [11] 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.
- [12] 刘柏. 不同放牧方式对草地土壤氮矿化速率的作用及调控机制[D]. 长春: 东北师范大学, 2018.
- [13] 韩梦琪, 潘占磊, 靳宇曦, 等. 短花针茅荒漠草原土壤氮素矿化对载畜率的响应[J]. *草业学报*, 2017, 26(9): 27–35.
- [14] 陈懂懂, 孙大帅, 张世虎, 等. 青藏高原东缘高寒草甸土壤氮矿化初探[J]. *草地学报*, 2011, 19(3): 420–424.
- [15] 杨小红, 董云社, 齐玉春, 等. 锡林河流域羊草草原暗栗钙土矿质氮动态变化[J]. *地理研究*, 2005(3): 69–75.
- [16] 王向涛. 放牧强度对高寒草甸植被和土壤理化性质的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [17] 王喜明. 碳氮添加对藏北高寒草甸土壤碳氮矿化及氮素转化速率的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [18] Yuan L, He N P, Wen X F, *et al.* Patterns and regulating mechanisms of soil nitrogen mineralization and temperature sensitivity in Chinese terrestrial ecosystems[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 215: 40–46.
- [19] 王玉辉, 何兴元, 周广胜. 放牧强度对羊草草原的影响[J]. *草地学报*, 2002, 10(1): 45–49.
- [20] 牛书丽, 王松, 汪金松, 等. 大数据时代的整合生态学研究——从观测到预测[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(10): 1323–1338.
- [21] 孙大帅. 不同放牧强度对青藏高原东部高寒草甸植被和土壤影响的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [22] Shan Y, Chen D, Guan X, *et al.* Seasonally dependent impacts of grazing on soil nitrogen mineralization and linkages to ecosystem functioning in Inner Mongolia grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1943–1954.
- [23] Yan R, Yang G, Chen B, *et al.* Effects of livestock grazing on soil nitrogen mineralization on Hulunber meadow steppe, China[J]. *Plant Soil and Environment*, 2016, 62(5): 202–209.
- [24] 武丹丹, 井新, 林笠, 等. 青藏高原高寒草甸土壤无机氮对增温和降水改变的响应[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(5): 959–966.
- [25] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

# Effects of grazing intensity on soil nitrogen mineralization in different type of grasslands in China based on meta-analysis

ZHU Hui<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, WANG Yun-ying<sup>3</sup>, XU Qing-min<sup>1</sup>, DU Yan-gong<sup>3</sup>

(1. *Ecology and Environment Monitor Center in Qinghai Province, Xining 810001*; 2. *Bureau of Natural Resources and Planning of Jiaxiang County, Jining 272000*; 3. *Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining, 810008*)

**Abstract:** Nitrogen is a primary limiting factor of grassland production function. Nitrogen mineralization is an important index of grassland nitrogen fertility. The net nitrogen mineralization rate of grassland ecosystem had different response characteristics to grazing disturbance in China. In this study, the data from 32 experiments on the effects of grazing on grassland mineralization in China were analyzed by a meta-analysis method. The results indicated that grazing slightly increased soil net nitrogen mineralization rate by  $\sim 0.68\%$ , with an average effect value of  $0.01 \pm 0.13$  (95% confidence interval:  $-0.24 \sim 0.25$ ). Grazing significantly increased the mineralization of alpine meadow ( $P < 0.01$ ), with an average effect value of  $0.38 \pm 0.10$ . Grazing reduced soil net nitrogen mineralization rate in temperate steppe, temperate desert and swamp wetland ( $P < 0.05$ ). Grazing intensity had significant effects on the average effect value ( $P < 0.0001$ ). Light and moderate grazing increased nitrogen mineralization rate by 13.88% and 5.12% respectively, while heavy grazing reduced nitrogen mineralization rate by 9.42%. Soil moisture and altitude had significant positive effects on the average effect value ( $P < 0.05$ ), which could explain 14.30% and 13.61% of variation in effect value, respectively. Light and moderate grazing are beneficial to improve the nitrogen mineralization and supply capacity of grassland ecosystem, while heavy grazing may aggravate the nitrogen limitation of grassland ecosystem biomass production.

**Key words:** soil N Mineralization; effect size; effect size variation; grazing intensity;

---

## 版权声明

为扩大本刊及作者知识信息交流渠道,加强知识信息推广力度,本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在 CNKI 中国知网及其系列数据库产品中,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该著作权使用费及相关稿酬,本刊均用作为作者文章发表、出版、推广交流(含信息网络)以及赠送样刊之用途,即不再另行向作者支付。凡作者向本刊提交文章发表之行为即视为同意编辑部上述声明。